

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Cristoffer Fernandes

Projeto e Simulação de sistema de separação de cinzas para caldeiras a biomassa

Tese de Mestrado

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor José Carlos Fernandes Teixeira

Professor Doutor Manuel Eduardo Cardoso Ferreira

DECLARAÇÃO

Nome: Cristoffer Fernandes

Endereço electrónico: Cristofferf@gmx.com

Telefone: 00351 916749070

Número do cartão de cidadão: 13529198

Título dissertação: **Projeto e Simulação de sistema de separação de cinzas para caldeiras a biomassa**

Orientadores: Professor Doutor José Carlos Fernandes Teixeira, Professor Doutor Manuel Eduardo Cardoso Ferreira

Ano de conclusão: 2011

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha tese ou dissertação, no todo ou em parte, em suporte digital.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da tese ou dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a tese ou dissertação entregue, para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à tese ou dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha tese ou dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto:

- Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial;

Universidade do Minho, 31/10/2011

Assinatura: _____

Agradecimentos

Embora uma dissertação, que na sua finalidade académica é um processo solitário a que qualquer investigador está destinado, existem contributos de forma académica ou pessoal, que não podem ser esquecidos, uma vez que sem estes contributos a realização da dissertação não teria sido possível. Por essa razão desejo expressar os meus mais sinceros agradecimentos:

Aos meus orientadores Doutor José Carlos Teixeira e Doutor Manuel Eduardo Ferreira, pela partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho;

À empresa Vimasol, na pessoa do Sr. Rui Pereira, pelo fabrico do equipamento e peças essenciais à construção da instalação experimental;

A todos os familiares pelo incentivo e apoio recebido ao longo destes anos: aos meus pais, Martinho e Augusta, pelo amor, força e atenção sem reservas e à minha irmã Helena pela compreensão, motivação e o sorriso que me dedicou;

Aos colegas e amigos pela discussão de ideias e sugestões influentes;

Finalmente, a todos os que contribuíram na realização desta dissertação de forma direta ou indireta.

Resumo

Aumentar a eficiência de equipamentos e reduzir a libertação de poluentes representam os maiores desafios da atualidade. No que diz respeito à redução de poluentes, os estudos e recentes desenvolvimentos englobam o aperfeiçoamento no aproveitamento dos materiais e a redução das emissões após os processos. A geração de calor e energia eléctrica com biomassa apresenta como desvantagem em relação aos combustíveis gasosos, a emissão de partículas nos gases de combustão.

O presente trabalho visa o desenvolvimento de um sistema de separação de partículas a jusante de uma caldeira a biomassa. Para tal, realizou-se o projeto de um ciclone de forma a diminuir os poluentes libertados durante a combustão e que de outra forma seriam expulsos pela chaminé para o meio ambiente.

Recorrendo à simulação dinâmica do escoamento foi utilizado o *Ansys FLUENT* para o desenho, a construção de malha e o *FLUENT* para a solução numérica propriamente dita, de forma a estudar o escoamento formado no interior do ciclone. Assim foram projetados três ciclones de tamanhos diferentes, compatíveis com uma chaminé standard e analisada a eficiência de cada um. Os resultados obtidos englobam o perfil de velocidade, velocidades máximas e mínimas, a perda de carga, e o movimento de partículas.

Na fase seguinte foi escolhido o ciclone que apresentou as melhores características para a construção de um protótipo. Foram realizados testes para determinar a pressão estática na entrada e na saída do ciclone a velocidades diferentes de forma a determinar a perda de carga real no ciclone e esses foram comparados com a perda de carga simulada.

Palavras-chave: Biomassa, Cinzas, Ciclones, Emissões

Abstract

Increasing the efficiency of equipment's and reduce the release of pollutants are the two major challenges of today's generation. Regarding the reduction of pollutants and their impact on the environment, recent studies and developments focus on the improvement in the usage of materials and the reduction of emissions during processes. On the background of heat, an electrical energy generation with biomass, the release of pollutants is the major disadvantage compared to the combustion of gas fuel.

The present project aims to develop a system of separation of particles release of a biomass boiler. To this end the project involved the study of a cyclone to reduce the number of pollutants released during combustion which otherwise would be released to the environment through the chimney.

Computational Fluid Dynamics simulations, in this specific case *Ansys FLUENT*, were used for the design, construction of the mesh and the study of the flow formed inside the cyclone. Therefore three cyclones of different size were designed, compatible to be coupled to a standard chimney, and the efficiency of each of one is determined. The results include the velocity profile, maximum and minimum velocities, pressure, including the pressure drop, and particle motion.

In the next phase was chosen the cyclone that presented the best characteristics for production of a prototype. Subsequent were performed tests to determine the static pressure at the inlet and the outlet of the cyclone at different velocities in order to find the actual pressure drop in the cyclone to then be compared with the simulated pressure drop.

Keywords: Biomass, Ash, Cyclones, Emissions

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas.....	xvi
Nomenclatura.....	xvii
1. Introdução	1
1.1 Aplicação da biomassa	1
1.2 Motivação e enquadramento do trabalho	1
1.3 Objectivos do trabalho	2
1.4 Organização da tese	2
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Biomassa – composição e combustão	5
2.2 Pellets.....	7
2.2.1 Produção de pellets.....	8
2.2.2 Certificação de Qualidade	9
2.3 Cinzas na combustão a biomassa.....	11
2.4 Caldeiras a biomassa	12
2.4.1 Caldeiras a lenha	12
2.4.2 Caldeiras a estilha de madeira.....	13
2.4.3 Caldeiras a pellets	14
2.5 Separadores de gases	15
2.5.1 Câmaras de sedimentação gravítica	16
2.5.2 Ciclone.....	17
2.5.3 Colectores dinâmicos	18
2.5.4 Precipitadores Electrostáticos	19
2.5.5 Filtros de manga.....	21
2.5.6 Colectores húmidos.....	22

2.5.7	Comparação entre separadores de gases	23
2.6	Estudo teórico sobre ciclones	24
3.	Computação dinâmica	29
3.1	Ansys FLUENT	29
3.2	Modelação matemática do escoamento turbulento	29
3.3	Modelo de turbulência	30
3.4	Opções avançadas do Reynold Stress Model	33
3.5	Interação fluido partículas	34
3.6	Simulação dinâmica	34
3.6.1	Geometria	35
3.6.1.1	Eficiência de separação – aproximação teórica	36
3.6.2	Malha	39
3.6.3	Condições de fronteira	40
4.	Instalação experimental	42
4.1	Determinação de perda de carga	42
4.2	Equipamento e instalação experimental	43
5.	Resultados e Discussão	48
5.1	Resultados Ansys FLUENT	48
5.2	Resultados experimentais	54
5.3	Comparação de resultados	55
6.	Conclusões e trabalho futuro	58
6.1	Conclusões	58
6.2	Trabalho futuro	59
	Referências Bibliográficas	61
	Anexos	63
	Anexo A – Massa volúmica das partículas – teste experimental	64
	Anexo B – Desenhos Ciclone	66
	Anexo C - Resultados <i>FLUENT</i>	69

Anexo D – Resultados Perda de carga Testes reais	82
Anexo E – Artigo científico CIBEM 10.....	85
Apêndices	94
Apêndice A – SODECA Catalogo General.....	95

Índice de Figuras

Figura 2.1 Composição da biomassa [1]	6
Figura 2.2 Relação massa/energia dos componentes da biomassa [1]	7
Figura 2.3 Produção de pellets [2]	9
Figura 2.4 Caldeira a lenha e as zonas de combustão	13
Figura 2.5 3 tipos de caldeiras a pellets (alimentação de topo ,horizontal e fundo) [1]	14
Figura 2.6 Câmara gravítica de sedimentação [5]	17
Figura 2.7 Escoamento no interior do ciclone [6]	18
Figura 2.8 Colector dinâmico	19
Figura 2.9 Precipitadores Electrostáticos [5]	20
Figura 2.10 Filtro de manga (equipamento e superfície do filtro) [5]	21
Figura 2.11 Torre de lavagem e lavador com efeito venturi [5]	22
Figura 2.12 Relação perda de carga e velocidade de entrada - 3 ciclones de tamanho diferente [7]	27
Figura 3.1 Ciclone tipo Stairmand [10]	35
Figura 3.2 Influência da velocidade de entrada no <i>Cutoff Diameter</i>	38
Figura 3.3 Ciclone A com e sem malha	39
Figura 4.1 Esquema da instalação experimental	44
Figura 4.2 Ciclone fabricado antes e depois de preparações para experiencias	45
Figura 4.3 Ventilador Sodeca modelo CA-142-2T-0.5	46
Figura 4.4 Manómetro Digital – Marca: LOVE Control Modelo:HM28	47
Figura 4.5 Instalação experimental: Ventilador - Ciclone	47
Figura 5.1 Perfil de escoamento do Ciclone B a uma velocidade de entrada de 20 m.s^{-1}	49
Figura 5.2 Contornos da magnitude das velocidades no Ciclone A,B e C a uma velocidade de entrada de 15 m.s^{-1} no plano XY	50

Figura 5.3 Contornos da magnitude da pressão estática no Ciclone A,B e C a uma velocidade de entrada de 15 m.s^{-1} no plano XY	51
Figura 5.4 Perda de carga nos 3 ciclones para velocidade de entrada 10,15 e 20 m.s^{-1}	52
Figura 5.5 Probabilidade de Captura para Ciclone A,B e C a uma velocidade de entrada de 10 m.s^{-1}	53
Figura 5.6 Valores experimentais da perda de carga em função da velocidade de entrada	54
Figura 5.7 Comparação de perda de carga – Teste real e Simulação.....	56
Figura A.1 Teste experimental - massa volúmica das cinzas.....	65
Figura B.1 Desenho técnico Ciclone C	67
Figura B.2 Transição I para Ciclone C	68
Figura B.3 Transição II para Ciclone C	68
Figura C.1 Ciclone A 10 ms^{-1}	70
Figura C.2 Ciclone A 15 ms^{-1}	70
Figura C.3 Ciclone A 20 ms^{-1}	71
Figura C.4 Ciclone B 10 ms^{-1}	71
Figura C.5 Ciclone B 15 ms^{-1}	72
Figura C.6 Ciclone B 20 ms^{-1}	72
Figura C.7 Ciclone C 10 ms^{-1}	73
Figura C.8 Ciclone C 15 ms^{-1}	73
Figura C.9 Ciclone C 20 ms^{-1}	74
Figura C.10 Ciclone A 10 ms^{-1}	75
Figura C.11 Ciclone A 15 ms^{-1}	75
Figura C.12 Ciclone A 20 ms^{-1}	76
Figura C.13 Ciclone B 10 ms^{-1}	76
Figura C.14 Ciclone B 15 ms^{-1}	77
Figura C.15 Ciclone B 20 ms^{-1}	77

Figura C.16 Ciclone C 10 ms^{-1}	78
Figura C.17 Ciclone C 15 ms^{-1}	78
Figura C .18 Ciclone C 20 ms^{-1}	79
Figura C.19 Ciclone A,B e C á 15 ms^{-1}	81
Figura C.20 Ciclone A,B e C á 20 ms^{-1}	81
Figura D.1 Perda de carga 26.09.2011.....	83
Figura D.2 Perda de carga dos dois testes realizados	84

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Tipos de madeiras permitidos nas três classes da ENplus [3]	10
Tabela 2.2 Requisitos de qualidade e pellets das normas alemãs, austríacas e da ENplus [3] [4]	11
Tabela 2.3 Características principais dos separadores de gases.....	23
Tabela 2.4 Geometrias padrão de diferentes tipos de ciclones industriais [8]	26
Tabela 3.1 Constantes do RSM no <i>FLUENT</i>	33
Tabela 3.2 Dimensões geométricas dos 3 ciclones	36
Tabela 3.3 Número de partículas inseridas no escoamento por ciclone	40
Tabela 5.1 Probabilidade de captura do Ciclone A para diâmetros e velocidades diferentes.....	53
Tabela 5.2 Características do ar à 20 e 150C.....	57
Tabela C.1 Ciclone B (832 partículas por diâmetro)	79
Tabela C.2 Ciclone C (608 partículas por diâmetro)	79
Tabela C.3 Ciclone A, B e C á 10 ms^{-1}	80
Tabela C.4 Ciclone A,B e C á 15 ms^{-1}	80
Tabela C.5 Ciclone A,B e C á 20 ms^{-1}	80
Tabela D.1 Teste perda de carga 23.09.2011	83
Tabela D.2 Teste de perda de carga 26.09.2011.....	83

Nomenclatura

Símbolos	Definição	Unidades
Romanos		
a	altura de entrada do ciclone	m
b	largura de entrada do ciclone	m
B	diâmetro de saída inferior do ciclone	m
C	factor de correção de Cunningham	-
D	diâmetro do corpo do ciclone	m
D_e	diâmetro de saída superior do ciclone	m
D_p	<i>Cutoff Diameter</i>	μm
F	força centrífuga	N
g	aceleração gravítica	-
h	altura do corpo cilíndrico do ciclone	m
H	altura do ciclone	m
k	energia cinética turbulenta	J
L	comprimento característico	m
m	massa	kg
p	pressão estática	Pa
P	pressão total	Pa
Q	caudal de entrada	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
Re	número de Reynolds	-
r	raio do corpo do ciclone	m
r_p	raio da partícula	m

S	profundidade do cilindro interior do ciclone	m
t	tempo	s
U	velocidade	m.s^{-1}
U_{ep}	velocidade na entrada do ciclone	m.s^{-1}
U_{jmax}	velocidade máxima no interior do ciclone	m.s^{-1}
U_t	velocidade tangencial	m.s^{-1}
U_r	velocidade radial	m.s^{-1}
U_{ri}	velocidade do escoamento a um dado raio r_i	m.s^{-1}
z	altura	m

Símbolos	Definição	Unidades
Gregos		
ε	taxa de dissipação de energia cinética	W
ρ	massa volúmica	kg.m^{-3}
ρ_f	massa volúmica do fluido gasoso	kg.m^{-3}
μ	viscosidade dinâmica	$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$
i,j,k	componentes do sistema de coordenadas Cartesianas	-

1. Introdução

No final do século XX, surgiu uma nova consciencialização sobre a utilização de recursos energéticos fósseis, devido ao seu carácter finito e pelos problemas ambientais daí resultantes. Neste contexto, a EU estabeleceu para 2020 a meta de utilização de 20% de energia renovável e a redução das emissões de gases de estufa em 20%. O peso do sector residencial e de edifícios representa cerca de 40% do consumo de energia primária na Europa pelo que tem sido objeto de diretivas no sentido de incrementar a eficiência de utilização energética e, em simultâneo, diversificar as fontes de energia primária.

1.1 Aplicação da biomassa

No contexto de desenvolvimento e aperfeiçoamento, a biomassa representa uma alternativa de elevado potencial sendo um recurso renovável e endógeno. O recente desenvolvimento de tecnologias para o uso eficiente na geração de eletricidade e calor torna a biomassa uma alternativa atraente. De entre estas, as aplicações diretas na geração de calor apresentam-se particularmente atrativas, sendo economicamente competitivas em comparação com os combustíveis fósseis.

Em termos de impacto ambiental, é importante referir que as emissões de CO_2 , não causam um incremento do efeito de estufa uma vez que o CO_2 libertado corresponde ao absorvido pela própria planta durante o seu ciclo de vida. A combustão de biomassa apresenta como principal inconveniente a libertação de cinzas, problema que é particularmente importante em instalações domésticas. A emissão de cinzas depende do seu teor no combustível e da não retenção no interior da câmara de combustão. A sua redução passa pois pela atuação ao nível do combustível, da câmara de combustão ou em ações a jusante desta.

1.2 Motivação e enquadramento do trabalho

De forma a diminuir o impacto ambiental e reduzir a libertação de partículas para o meio ambiente, a introdução de sistemas de limpeza a jusante de uma caldeira a biomassa, ou neste caso específico a pellets, aparece com elevado potencial, em particular para equipamentos já existentes. Os sistemas existentes têm ainda níveis de emissões de partículas elevadas mas é de prever que venham a ser fortemente reduzidos. A

existência de um sistema de limpeza permite a utilização de biomassa de menor qualidade (com maior teor de cinzas mas também mais acessível), para além de permitir o cumprimento dos limites legais das emissões gasosas. Deste modo, faz sentido o desenvolvimento de sistemas eficazes de limpeza de cinzas, a jusante da câmara de combustão. Os separadores ciclónicos encontram-se entre os mais promissores. Os ciclones são, pela inexistência de partes móveis, simples em termos de funcionamento e manutenção e apresentam um baixo custo. A maior dificuldade encontra-se ao nível do espaço que ocupam e da necessidade de elevadas acelerações que por sua vez causam grandes perdas de carga.

1.3 Objectivos do trabalho

O presente projeto visa o desenvolvimento e ensaio de um sistema de limpeza por via seca a ser adaptado a uma chaminé standard numa caldeira doméstica a pellets. Recorrendo a ferramentas de computação em dinâmica de fluidos (*Ansys FLUENT*), o objetivo deste trabalho é encontrar uma solução apropriada em termos de atravancamento e teor de cinzas removidos, recorrendo a um ciclone.

Detalham-se seguidamente os objectivos específicos a alcançar:

- Caracterização do escoamento em ciclones
- Projeto de 3 ciclones
- Estudo do escoamento com as condições de fronteira estipuladas
- Estudo da interação de partículas com o escoamento e determinação da eficiência
- Escolha de um ciclone com características mais apropriadas
- Fabrico e ensaio prático do ciclone escolhido

1.4 Organização da tese

No segundo capítulo é efectuada uma revisão bibliográfica sobre a biomassa na sua generalidade, abordando a sua composição e combustão, com um foco nos pellets, descrevendo a sua produção, normas de qualidade em alguns países membros da UE e a formação de cinzas. Procede-se em seguida a uma

descrição dos diferentes tipos de caldeiras a pellets com uma revisão final dos filtros de gases que são utilizados na indústria.

O terceiro capítulo aborda a computação dinâmica, relatando as vantagens do software *Ansys FLUENT*, que será utilizado para a presente dissertação e descrevendo a modelação numérica. Neste capítulo são abordados os diferentes modelos de turbulência que o *FLUENT* disponibiliza e a escolha do modelo mais apropriado para a simulação dinâmica. No final são apresentados os passos realizados no *Ansys FLUENT* nomeadamente o desenho do espaço interior do ciclone, a construção da malha e as condições de fronteira estipuladas, que se baseiam nas características do ar a uma temperatura de 150°C.

No quarto capítulo é descrita a instalação experimental para o ensaio do protótipo fabricado. É apresentada a instalação experimental, incluindo todos os equipamentos utilizados.

O quinto capítulo aborda a exposição dos resultados obtidos na simulação dinâmica, nomeadamente do perfil de escoamento, com as velocidades alcançadas nas diversas partes do ciclone, perda de carga em todo o equipamento e o movimento de partículas. Seguidamente são expostos os resultados dos testes experimentais e no final do capítulo é realizado uma comparação dos resultados obtidos pela simulação dinâmica com os testes reais.

O texto termina com as conclusões principais deste projeto e sugestões para o trabalho no futuro.

Uma exposição de todos os resultados retirados do *Ansys FLUENT*, os desenhos técnicos e o artigo científico, publicado no congresso científico CIBEM 10, encontram-se em anexo de forma a completar o corpo principal desta dissertação.

2. Revisão Bibliográfica

Nos últimos anos, a utilização de biomassa, como fonte de energia renovável, aumentou consideravelmente no âmbito da geração de calor e energia eléctrica. Este desenvolvimento dá-se devido ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão, tornando-a economicamente competitiva, e de uma nova percepção do impacto do homem sobre o meio ambiente. A biomassa apresenta um elevado potencial, sendo uma fonte de energia renovável, e do ponto de vista ambiental é importante referir que as emissões de CO₂, não causam um incremento do efeito de estufa uma vez que o CO₂ libertado está em igual proporção ao absorvido pela própria planta durante o seu ciclo de vida. Embora a literatura pública seja extremamente vasta, quer sobre o ponto de vista de biomassa, caldeiras e filtros de gases, optou-se por essencialmente estudar esses no contexto da constituição e funcionamento. Deste modo, esta revisão bibliográfica é iniciada com uma análise das características da biomassa, focado nos pellets (produção, normas etc.), seguindo-se uma abordagem das caldeiras a pellets, tratando do seu funcionamento e aplicação. No fim será realizada uma abordagem sobre os diferentes filtros de gases, destacando o funcionamento e área de aplicação.

2.1 Biomassa – composição e combustão

A biomassa, sendo um material orgânico, é na sua constituição um material não homólogo. As suas propriedades e constituição influenciam o seu comportamento na combustão. O estudo de biomassa engloba a comparação de diversas propriedades como a quantidade de água no combustível, cinzas, gases voláteis libertadas, etc.

Os constituintes da biomassa, como são ilustrados na Figura 2.1, podem ser separados em dois subgrupos: elementos combustíveis e não combustíveis. Os elementos combustíveis, como o nome indica, reagem durante a combustão enquanto os não combustíveis são transformados em cinzas. Os elementos combustíveis ainda são divididos em gases voláteis e resíduos carbonosos. Os gases voláteis são libertados na fase de secagem da biomassa (entre os 200 e 260°C), seguidamente ocorre a ignição homogénea e a sua combustão. No início da combustão dos resíduos carbonosos, temos a ignição heterogénea das partículas e continuamente a sua oxidação. Portanto existem duas zonas de combustão: uma junta à partícula e outra afastada. Comparando a biomassa na sua generalidade com o carvão, observa-se uma quantidade de voláteis

significativamente maior. Como resultados temos uma vaporização da maior parte do combustível orgânico antes da combustão homogênea da mesma e posteriormente uma combustão heterogênea dos restantes elementos (resíduo carbonoso). Destaca-se que, a quantidade de voláteis na biomassa estabelece a configuração de combustão.

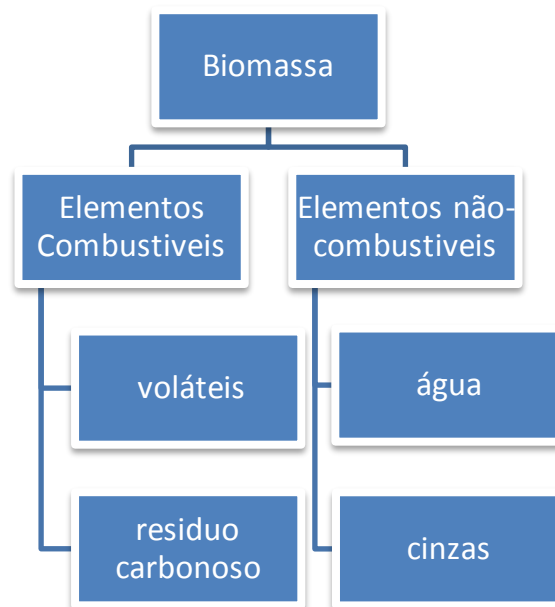


Figura2.1 Composição da biomassa [1]

A Figura 2.2 demonstra a relação massa/energia, das cinzas, resíduo carbonoso e voláteis. Os elementos que se transformam em cinzas não contribuem para um aumento da energia retirada, uma vez que não fazem parte da reação de combustão. Observe-se que na comparação entre os voláteis e o resíduo carbonoso o segundo tem um ganho superior ao primeiro, contudo os voláteis apresentam uma maior percentagem tornando esses o maior contributo de energia na combustão.

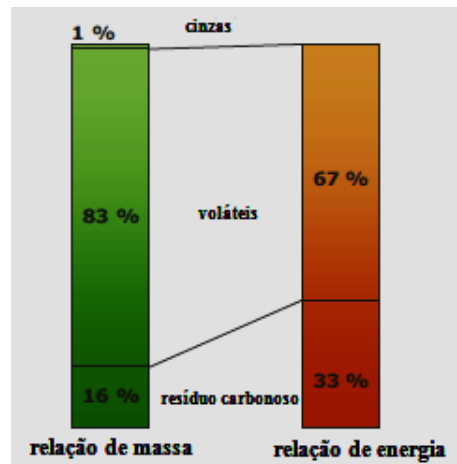


Figura 2.2 Relação massa/energia dos componentes da biomassa [1]

2.2 Pellets

De entre os combustíveis sólidos derivados de biomassa, os pellets, sendo basicamente uma forma mais compacta das biomassas convencionais (como a madeira) apresentam as melhores características no mercado existente. Os pellets são essencialmente constituídos por resíduos e subprodutos das indústrias que utilizem a madeira como matéria-prima. Maioritariamente é utilizada madeira de árvores coníferas e com uma percentagem de 10 a 30 % plantas caducas (plantas que perdem a folha). É costume que os resíduos e subprodutos de diversas fontes sejam misturados de forma a obter uma massa mais homogênea com um conteúdo de lignina constante. A lignina, um componente que se encontra em concentrações diferentes nas madeiras, é importante na produção, uma vez que é responsável pelo endurecimento na formação de pellets.

Os pellets destacam-se por diversas vantagens em relação a outros combustíveis para a geração de calor:

- devido ao tratamento na produção e o reduzido teor de humidade, a queima de pellets permite uma combustão mais eficiente, com uma libertação de fumos menor quando comparado com a lenha, por exemplo;
- como a sua matéria-prima é maioritariamente resíduos de madeira e madeiras recicladas (subprodutos da indústria mobiliária e desperdícios gerados pela própria floresta), consegue ser mais barata que outros combustíveis;
- a sua utilização diminui a dependência energética de outros combustíveis como o gás e o petróleo;

- ao contrário das outras energias renováveis apresenta uma disponibilidade permanente, isto é, está disponível quando se necessita;
- em relação aos outros combustíveis, especialmente a madeira, ocupa menos espaço de armazenamento e é mais segura, não possui os riscos associados ao gás ou petróleo (fugas ou perigo de explosão).

2.2.1 Produção de pellets

A produção de pellets, conforme pode ser observado Figura 2.3, engloba quatro fases: secagem, moagem, pelletização e arrefecimento. A secagem é efectuada quando a matéria-prima tem uma percentagem de água superior a 15%, porque nestas circunstâncias torna-se muito difícil a formação dos pellets. Entre a secagem e a moagem da matéria-prima é comum haver um passo intermédio de remoção de componentes não desejados, como metais. Este é particularmente desejável quando na produção é utilizado madeira reciclada (embora será tipicamente abaixo de um diâmetro de 5 mm). A finalidade na fase de moagem é conseguir um pó de madeira com uma granulometria uniforme, uma vez que o material que chega pode ser muito heterogéneo em termos de dimensão. Na formação dos pellets, pelletização, o pó de madeira pode ser aquecido até 70°C utilizando vapor para iniciar a libertação de lignina de forma a auxiliar a união dos elementos. Seguidamente, o material passa para uma prensa de rolo onde é comprimido na forma de pellets com o comprimento e diâmetro pretendido. Diversas condições são importantes para uma boa prensagem e uma boa qualidade do produto final:

- boa correlação entre qualidade da matéria-prima e a capacidade de compressão da máquina;
- qualidade de superfície e material da prensa de rolo e a matriz;
- diâmetro e comprimento dos furos;
- espessura da camada de matéria-prima a ser prensada;
- velocidade de rotação da prensa de rolo.

Na fase seguinte, os pellets, elásticos e quentes, são transportados para um dispositivo de refrigeração onde são arrefecidos para uma temperatura pouco acima da ambiente. Para obter uma refrigeração gradual e evitar um choque térmico, utiliza-se uma refrigeração por conta-corrente de ar frio.

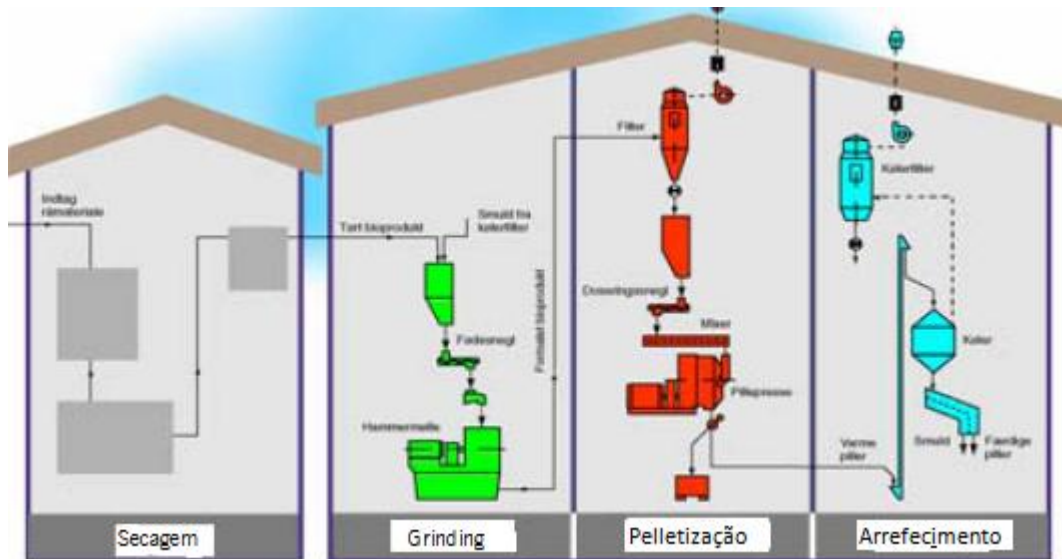


Figura 2.3 Produção de pellets [2]

2.2.2 Certificação de Qualidade

Conforme referido anteriormente, pode existir uma grande diversidade na constituição de pellets, devido ao tipo de madeiras utilizadas, processos de fabrico, etc. Esta diversidade pode causar uma discrepância na qualidade. A combustão para aquecimento, no ambiente doméstico, é geralmente um procedimento simples, mas pellets de fraca qualidade podem reduzir consideravelmente o rendimento do equipamento. Pellets com um elevado nível de cinzas podem causar a formação de escória na caldeira que por si limita a funcionalidade da mesma. A combustão de pellets com um elevado teor de água tem como resultado uma combustão incompleta, que seguidamente, vai levar a uma formação de cinzas e uma redução no rendimento.

Como a utilização e o desenvolvimento no âmbito da biomassa é relativamente novo ainda, não existe uma normalização unânime para todos os países membros da União Europeia. Países como a Alemanha e Áustria, que inicializaram o uso de pellets mais cedo que as outras nações, já estabeleceram normas a nível nacional

(DIN-Plus, DIN-51731, Ö-Norm M-7135 etc.). Nelas estipulam limites máximos sobre a quantidade de água, cinzas, enxofre, entre outros, e valores mínimos para o poder calorífico.

Em 2009, a associação industrial alemã de pellets (Deutsche Energieholz- und Pellet-Verband e.V.) em parceria com o centro de investigação de biomassa alemã (DBFZ), a *propellets* da Áustria e outros parceiros europeus desenvolveu uma nova norma chamada ENplus cuja influência vai além da produção de pellets. É concebida como um sistema de certificação de qualidade a nível europeu, de forma a introduzir um método de atestação igual para todos os países membros da União Europeia. Esta norma não só define limites na constituição de pellets mas também engloba todos os processos, desde a produção até à entrega ao utilizador. Pellets só podem ser vendidos com o certificado ENplus se todos os atores na cadeia de fornecimento forem certificados individualmente (produtores, comerciantes etc.). Além disso, ENplus não só abrange questões de qualidade, mas também critérios de sustentabilidade na segurança e abastecimento de forma fortalecer o desenvolvimento deste mercado crescente. Pretende-se que a independência do sistema de certificação seja garantida através do envolvimento de organizações de certificação credenciadas segundo a norma EN 45011. A ENplus é derivada da norma EN 14961-2 com diversas alterações, a mais importante sendo que materiais quimicamente tratados são excluídos da certificação. Distinguindo os tipos de madeiras que podem ser utilizados, existem 3 classes de qualidade: ENplus-A1, ENplus-A2 e EN-B (Tabela 2.1). As especificações das normas ENplus, DINplus, DIN-51731 e Ö- Norm M-7135 podem ser vistas na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 Tipos de madeiras permitidos nas três classes da ENplus [3]

ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B
haste de madeira	haste de madeira	resíduos de madeira
resíduos de madeira	resíduos de madeira	madeira de floresta e plantações
	árvores inteiras sem raízes	madeira utilizada
	resíduos da extração de madeira	

Tabela 2.2 Requisitos de qualidade e pellets das normas alemãs, austríacas e da ENplus [3] [4]

Parametros	DIN Plus	DIN - 51731	Ö- Norm M-7135	ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B
Diametro (mm)	4 - 10	4 - 10	4 - 10	5 - 7	5 - 7	5 - 7
Comprimento (mm)	5 x D	≤ 50	5 x D	3,15 - 40	3,15 - 40	3,15 - 40
Densidade (kg dm-3)	≥ 1,12	≥ 1 - 1,4	≥ 1,12	≥ 0,6	≥ 0,6	≥ 0,6
Humidade (%)	≤ 10	≤ 12	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cinzas (%)	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 0,5	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 3
Poder Calorifico (MJ kg-1)	≥ 18	15,5-19,5	≥ 18	≥ 16,5	≥ 16,5	≥ 16
Teor de enxofre (%)	≤ 0,04	≤ 0,08	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05
Teor de axoto (%)	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1
Teor de cloro (%)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,03

2.3 Cinzas na combustão a biomassa

As cinzas formadas durante a combustão podem ser divididas em 2 grupos, cinzas volantes e cinzas de fundo. As cinzas de fundo são as cinzas de tamanho maior que permanecem na câmara de combustão devido ao seu peso. À partida a recolha destas é rápido e simples e não contribui para a poluição do meio ambiente. A formação de cinzas volantes surge devido às reações que ocorrem na fase gasosa na câmara de combustão. Componentes particulares para a combustão de biomassa, como potássio (K), sódio (Na), enxofre (S) e cloro (Cl), e metais voláteis como zinco (Zn) e cádmio (Cd), são libertados do combustível e reagem no estado gasoso uns com os outros. Quando a pressão de vapor excede a pressão saturada do componente, sendo o caso com uma elevada taxa de formação do componente ou por uma diminuição das temperaturas, ocorre, por nucleação ou condensação dos vapores nas superfícies existentes, a formação de partículas. Logo o maior efeito pela formação de cinzas é a combustão incompleta e para conseguir uma redução efetiva de cinzas formadas é necessário um controlo da injeção de combustível e do ratio entre ar e combustível.

Contudo é impossível reduzir as emissões de cinzas para zero uma vez que o próprio combustível possui cinzas, elementos que não vão entrar na reação de combustão. Logo a única forma de prevenir a libertação de cinzas para o meio ambiente é por meio de filtros de captura de partículas.

2.4 Caldeiras a biomassa

A queima de biomassa e a utilização de caldeiras passou por diversas etapas de desenvolvimento, aumentando a eficiência da combustão e subsequentemente o aproveitamento do calor libertado. Antigamente era comum o carregamento manual da biomassa em fornos e lareiras, um sistema que ainda se encontra em muitas casas domésticas em Portugal. O utilizador enchia o forno com a biomassa e recarregava conforme as suas necessidades. O ar entra na câmara de combustão de lado, a queima ocorre no topo da biomassa (top burning) ou por baixo de uma grelha, dando origem a uma queima através da biomassa (through burning). A eficiência desse procedimento é reduzida porque a própria combustão ocorre sem controlo. Em primeiro lugar é quase impossível ter uma libertação de calor constante uma vez que a carga de biomassa na câmara muda e está sujeita a um carregamento “a olho”. Esta circunstância traz ainda outro inconveniente que pode reduzir a eficiência da combustão: uma sobrecarga de biomassa com uma falta de oxigénio pode causar uma combustão incompleta que aumenta a formação de cinzas e origina uma maior libertação de CO e de outros subprodutos.

Hoje em dia é comum a utilização de caldeiras de alimentação de biomassa automática de forma obter uma carga constante com um controlo de ar para uma combustão mais completa.

2.4.1 Caldeiras a lenha

Caldeiras modernas a lenha baseiam-se na queima por baixo do reservatório do combustível (underburning) em que a combustão é controlada pela tiragem do ar (Figura 2.4). Um ventilador, que se situa na saída dos gases de escape, conduz o ar de combustão para as zonas de combustão. Um alto grau de turbulência é necessário para garantir a mistura certa de ar e combustível que é assegurada pelo desenho apropriado de entradas de ar na câmara de combustão. Durante a combustão lenha que se encontra nas camadas superiores a de combustão é pre-aquecido e seca dando a iniciação da gaseificação, libertação de voláteis. Estas caldeiras são projetadas de forma a possibilitar o carregamento durante a combustão sem haver libertação de gases de combustão. É comum que não só o ar do ambiente seja aquecido dessa forma mas também as águas sanitárias de forma a armazenar o calor libertado durante a combustão, uma vez que este tipo de caldeiras não vai estar constantemente ligado. Este tipo de equipamento tem uma libertação diminuta de poluentes e fumos quando comparando com uma fogueira ou forno tradicional com um

rendimento que até pode chegar a um valor superior a 90%. O nível de potência atingida por estas caldeiras normalmente encontra-se entre os 15 kW e 40 kW.

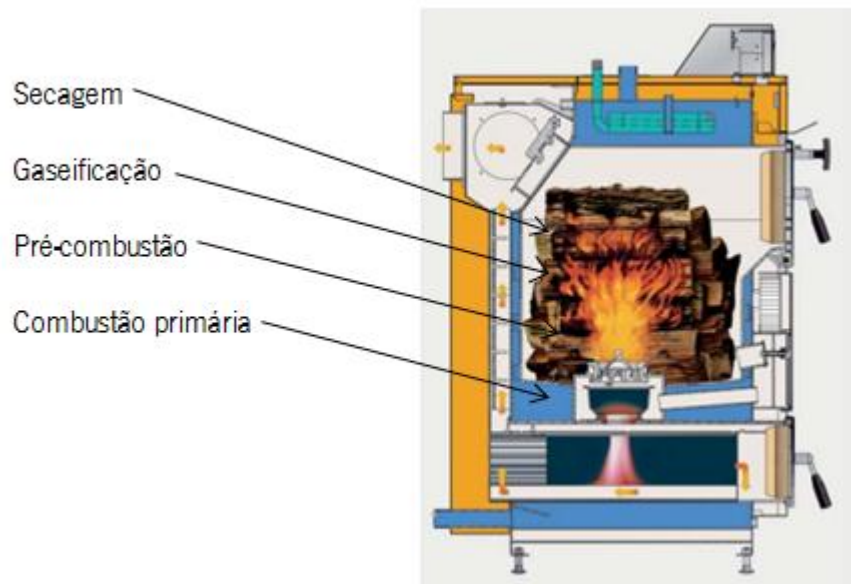


Figura 2.4 Caldeira a lenha e as zonas de combustão

2.4.2 Caldeiras a estilha de madeira

A estilha de madeira são pequenos pedaços de madeira. Maioritariamente são subprodutos das indústrias que trabalham com madeira, como serralharias e a indústria mobiliária. O que diferencia as caldeiras a estilha de madeira e de lenha é a possibilidade de uma alimentação constante de combustível. A alimentação consegue ser controlada conforme as necessidades do utilizador reduzindo o desperdício energético. Em termos de funcionamento é comum haver uma alimentação do combustível pela horizontal ou pelo fundo (semelhante a alimentação de caldeiras a pellets). Uma desvantagem da estilha de madeira é a maior necessidade de espaço de armazenamento comparando com a lenha e os pellets. A maior vantagem é o baixo custo. A potência das caldeiras a estilha de madeira normalmente abrange uma gama entre os 15 kW e os 20 MW.

2.4.3 Caldeiras a pellets

Conforme pode ser observado na Figura 2.5 existem três tipos de caldeiras a pellets de alimentação automática: alimentação de topo, na horizontal e de fundo.

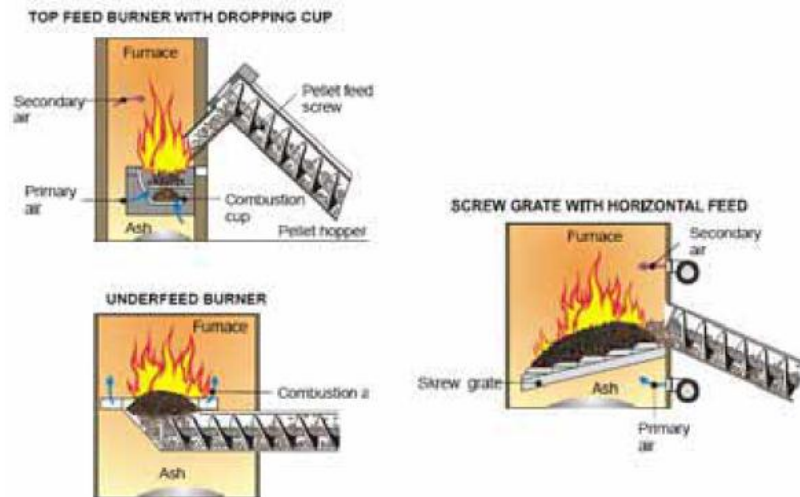


Figura 2.2 3 tipos de caldeiras a pellets (alimentação de topo ,horizontal e fundo) [1]

Nas caldeiras de alimentação de fundo os pellets são inseridos no fundo da câmara de combustão por um parafuso sem fim. Este tipo de caldeira é projetado para uma potência entre os 10 kW e 2 MW e é mais adequado para combustíveis com baixo teor de cinzas.

Em caldeiras de alimentação horizontal o combustível é introduzido por um parafuso sem fim na horizontal para a câmara de combustão. Na câmara de combustão os pellets são empurrados e realiza-se a secagem, a volatilização e a iniciação da combustão. As cinzas seguidamente caem para o fundo onde podem ser retiradas. As caldeiras com alimentação horizontal normalmente abrangem uma potência entre os 15 kW e 15 MW.

As caldeiras de alimentação de topo foram concebidas para aplicações de pequena escala sobretudo para uso doméstico. Os pellets são transportados por um parafuso sem fim, até um certo ponto acima da câmara da combustão. A partir deste ponto os pellets caem para a grelha onde se procede à combustão. Para não haver retorno da chama para o depósito de pellets é importante que haja uma distância adequada entre o

parafuso sem fim e a grelha de forma que a chama não chegue aos pellets no sem fim. A remoção de cinzas pode-se suceder de forma manual ou mecânica por uma grelha. Este tipo de alimentação possibilita uma alimentação exata conforme as necessidades de calor e por isso é favorecido para equipamentos de menor potência.

Todos estes tipos de caldeiras a pellets têm em comum uma tiragem forçada em que o ventilador pode-se encontrar na entrada de ar para a câmara de combustão ou na saída dos gases de escape.

2.5 Separadores de gases

No âmbito da despoluição do ar surgiram diversos métodos e equipamentos com o fim de retirar do ar contaminado as partículas poluentes antes que esses sejam libertados para o meio ambiente. Na escolha do equipamento certo é importante um estudo das partículas contaminantes a separar segundo a sua forma, densidade, aderência e hidroscoopia. Necessário será também uma análise das características do escoamento gasoso que funciona como o meio de transporte das partículas. Neste caso o foco está no caudal e na concentração das partículas contaminadas, logo é importante que o projetista englobe estes factores na escolha do equipamento e que estabeleça outros factores que serão importantes de considerar:

- Espaço disponível
- Eficiência desejada
- Perda de carga associada
- Características do escoamento (temperatura, quantidade de partículas etc.)
- Custo de investimento e manutenção etc.

No que diz respeito aos diversos equipamentos de controlo de emissões existem 5 tipos:

- Câmaras de sedimentação gravítica
- Colectores centrífugos (Ciclone e Colectores dinâmicos)
- Precipitadores Electrostáticos

- Filtros de manga
- Colectores húmidos

2.5.1 Câmaras de sedimentação gravítica

As câmaras de sedimentação gravítica são equipamentos de funcionamento simples e de baixo custo. Trata-se de uma câmara cuja secção transversal é superior à da conduta, diminuindo assim a velocidade do gás no sentido do escoamento (horizontal) (Figura 2.6). Isso possibilita a sedimentação de partículas de maior dimensão, pela força da gravidade. Observe-se que quando uma partícula entra na câmara a uma certa altura z ela vai demorar um determinado tempo t para percorrer a câmara. Caso o tempo de passagem seja maior que o tempo de sedimentação, que depende da altura a que se encontra dentro da câmara e massa da partícula, a partícula assenta no fundo da câmara e pode ser removida. Reconhecendo este processo é compreensível que quanto maior o comprimento da câmara, maior será o número de partículas que podem ser retiradas do ar. Dificuldades sucedem quando se trata de partículas com dimensão muito reduzida, porque o tempo de sedimentação será excessivo e uma construção de dimensão muito grande não é praticável. Maioritariamente as câmaras de sedimentação gravítica são utilizadas na indústria como um primeiro passo no tratamento de ar, seguindo outros processos para possibilitar a remoção de partículas com menor dimensão.

No que diz respeito a um tratamento de gases de escape de uma caldeira a biomassa este equipamento não é viável uma vez que só é adequado para a remoção de partículas de tamanho maior e as libertadas na combustão são pequenas demais.

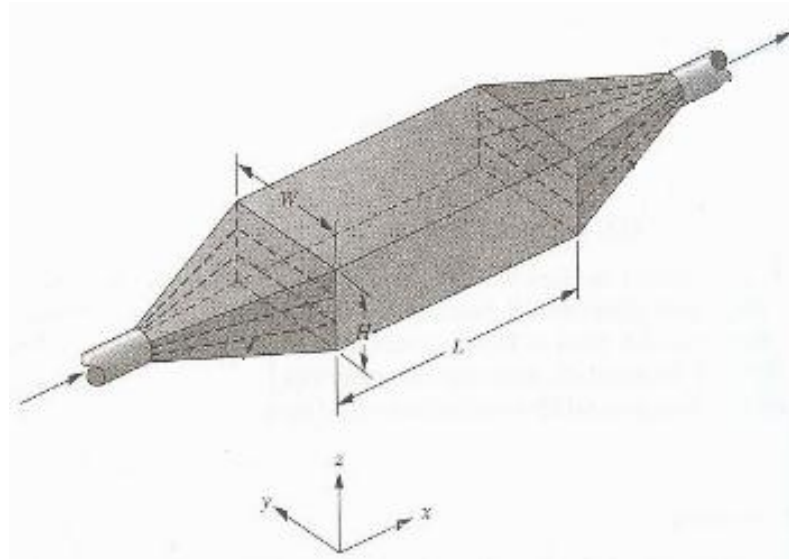


Figura 2.6 Câmara gravítica de sedimentação [5]

2.5.2 Ciclone

As câmaras de sedimentação gravítica na indústria têm um uso limitado uma vez que a sua capacidade de recolha de partículas de dimensão pequena é diminuta. Por isso foram desenvolvidos equipamentos que, no seu funcionamento, substituem a força gravítica por uma força maior para separar as partículas do gás. A força centrífuga (que por definição não é uma força no próprio sentido mas sim o resultado da inércia de um corpo em movimento e uma outra força que o obriga a movimentar-se num trajeto circular) é aproveitada.

O escoamento no interior do ciclone manifesta-se num escoamento numa trajetória helicoidal descendente perto das paredes (vórtice exterior) e seguidamente um escoamento helicoidal ascendente no interior do ciclone (vórtice interior). Este tipo de ciclone é ainda designado por ciclone de fluxo invertido porque o sentido de fluxo dos dois vórtices é distinto (mudança de sentido do escoamento no fundo do ciclone) conforme pode ser visto na Figura 2.7.

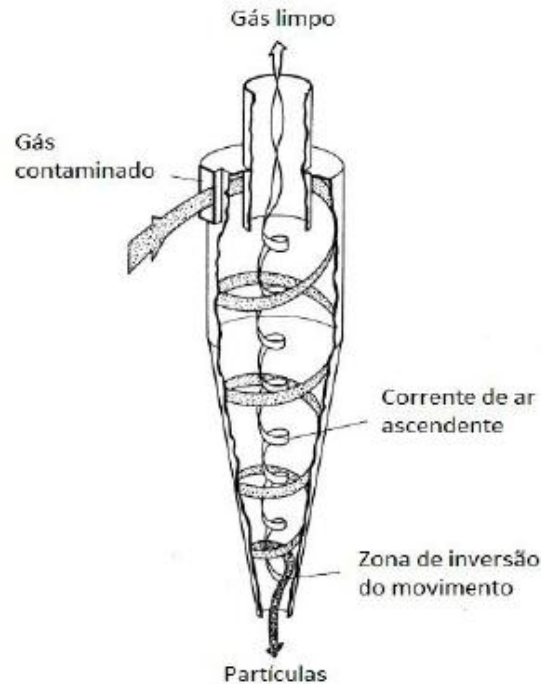


Figura 2.3 Escoamento no interior do ciclone [6]

As partículas de grande e média dimensão são projetadas contra as paredes do ciclone e assim separadas do gás. As características com maior peso são a geometria do ciclone e a velocidade de entrada. Estudos revelaram que com uma dimensão menor a eficiência de separação aumenta [7] e que quanto maior for a velocidade de entrada maior será a força centrífuga que atua nas partículas trazendo um aumento na eficiência de separação. Porém estas alterações aumentam a perda de carga do ciclone. Um projetista que opte por dimensionar este tipo de equipamento tem de ter em conta estas características e achar um consenso entre um aumento do rendimento, em termos da separação de partículas, e a perda de carga resultante. É comum a aplicação de diversos ciclones em paralelo de menores dimensão em vez de um de tamanho maior. A ideia é reduzir o tamanho dos ciclones, logo aumentar a eficiência, e ao mesmo tempo diminuir o caudal em cada um dos ciclones de forma a obter uma perda de carga menor.

2.5.3 Colectores dinâmicos

Este tipo de equipamento impõe uma força centrífuga ao gás contaminado através da ação de pás de uma turbina (Figura 2.8). Os colectores dinâmicos são muito compactos e destacam-se por uma eficiência de

separação maior que os ciclones. Porém a utilização de uma turbina implica a utilização de uma potência maior.

Uma das limitações na sua aplicação é na limpeza de gases com uma percentagem de humidade considerável, pois ocorrem acumulações nas pás que vão conduzir a estragos na mesma.

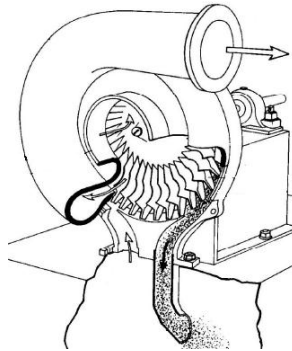


Figura 2.4 Colector dinâmico

A aplicação num domínio doméstico também podia ser alvo de estudo uma vez que este tipo de equipamento se destaca por dimensões relativamente pequenas. Neste caso será importante investigar o impacto dos gases de escape da caldeira e suas partículas nas pás do colector dinâmico.

2.5.4 Precipitadores Electrostáticos

Em aplicações industriais em que é importante a separação de partículas de dimensão menor que $2\ \mu\text{m}$ e em que os equipamentos referidos anteriormente não são viáveis recorre-se aos precipitadores electrostáticos (Figura 2.9). Para alcançar uma separação de um gás contaminado com partículas de pequena dimensão ($<2\ \mu\text{m}$) é necessário exercer forças mais poderosas que a força gravítica ou centrífuga. Neste tipo de equipamento aproveita-se da força electrostática para obter um movimento de partículas para as paredes, e assim posteriormente poder-se efetuar a separação das mesmas. A ideia básica é submeter as partículas a uma carga e seguidamente forçar a passagem por um campo electrostático que vai resultar num movimento em direção às paredes. A partir daí é possível a remoção das partículas acumuladas.

Na maioria das aplicações industriais as duas etapas (aplicar a carga e a separação dentro do campo electrostático) são realizadas numa só. A acumulação de partículas nas paredes obriga a uma extração das mesmas periodicamente. Em aplicações industriais é corrente a utilização de vários precipitadores electrostáticos em paralelo, mantendo-se sempre um deles numa fase de limpeza (remoção das partículas nas paredes).

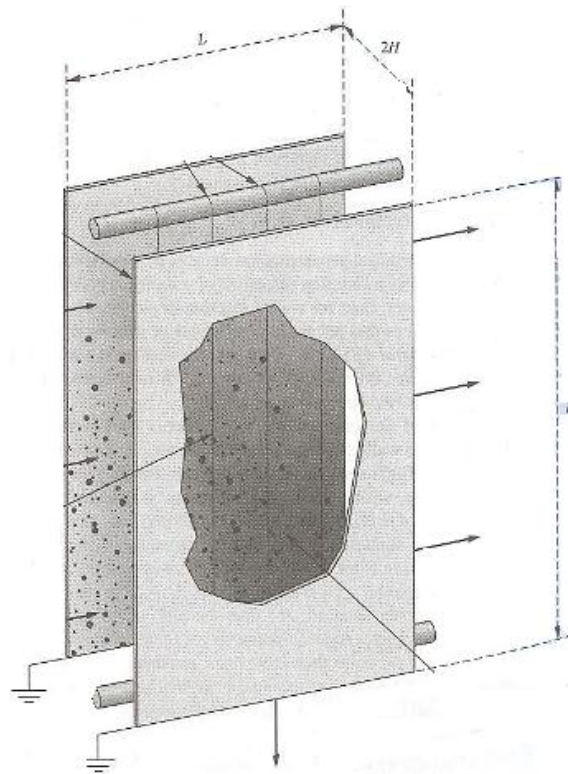


Figura 2.5 Precipitadores Electrostáticos [5]

A aplicação de precipitadores electrostáticos num domínio doméstico pode ser considerada como uma opção pouco viável comparando com as anteriormente referidas. Devido ao facto de durante as fases de limpeza não ser possível a utilização do mesmo a não ser que se utilize mais que um precipitador o que conduz a uma instalação de maior dimensão e um grande cuidado do utilizador (limpezas muito frequentes).

2.5.5 Filtros de manga

O funcionamento de um filtro de tecido é simples e longamente conhecido. Um filtro é uma membrana com orifícios de dimensão menor as partículas que são detidas nele. No entanto é muito difícil fabricar um filtro que é capaz de capturar partículas de pequena dimensão (Figura 2.10). Mas existe a possibilidade de, com acumulação de partículas de maior dimensão, chegar a uma filtragem na escala desejada. No início a membrana apresenta orifícios de uma dimensão maior. Quando o gás contaminado passa pelo filtro partículas de maior dimensão não conseguem passar. Depois de um determinado tempo, toda a membrana está coberta e só é possível a passagem de partículas de dimensão menor porque os orifícios da membrana estão parcialmente cobertos. Este processo continua até se chegar à eficiência de filtragem desejada que pode chegar até um diâmetro mínimo de $0.5\ \mu\text{m}$. Para que este método funcione de maneira pretendida é necessária a remoção de camadas captadas periodicamente.

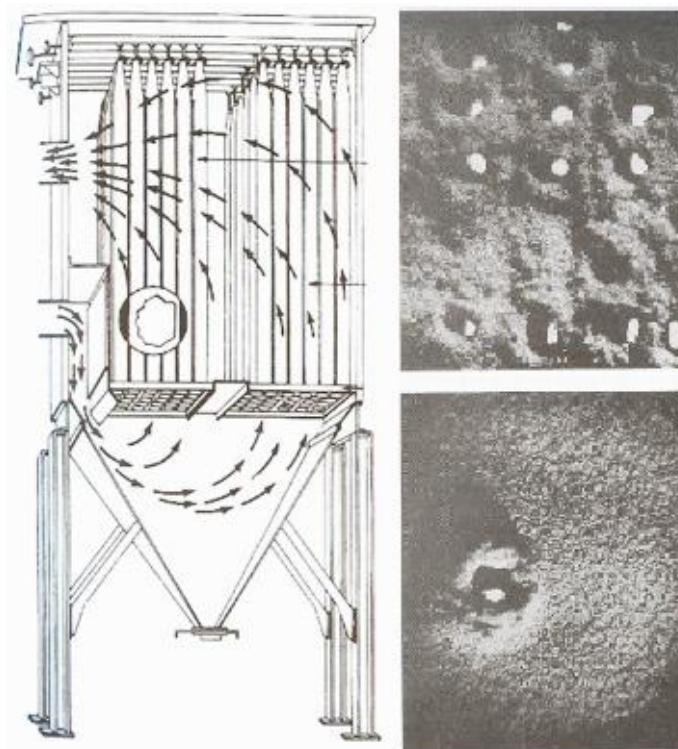


Figura 2.6 Filtro de manga (equipamento e superfície do filtro) [5]

Como nos precipitadores electrostáticos, este equipamento para uso doméstico não é viável uma vez que a remoção acompanha a necessidade de um grande cuidado do operador que neste âmbito não se torna praticável. É importante referir ainda que o filtro tem tecido e isso implica o risco de incêndios devido a temperatura elevada dos gases de escape.

2.5.6 Colectores húmidos

Os colectores húmidos (Figura 2.11) seguem um funcionamento simples mas eficiente. Quando um gás contaminado entra em contacto com água uma grande parte das partículas vai-se aglomerar à água e dessa forma purificar o gás. Um método utilizado são as torres de lavagem em que o ar contaminado entra na base da torre e enquanto sobe as partículas entram em contacto com as gotas de água, que são introduzidas por um sistema de chuveiros. Dessa forma o gás que sai do topo da torre tem uma percentagem de partículas contaminantes reduzida. Outros tipos de colectores húmidos são os ciclones por via húmida que consistem no ciclone e na introdução de água por jacto a alta pressão na entrada do ciclone. As partículas aglomeradas com a água são projetadas contra as paredes do ciclone e escoam para o fundo do mesmo. Também existem os lavadores com efeito venturi em que na entrada do equipamento o ar contaminado entra com alta velocidade ($60 - 180 \text{ m.s}^{-1}$) através de uma conduta de forma venturi junto com água, inserida com um spray. A água com as partículas aglomeradas é posteriormente recolhida.

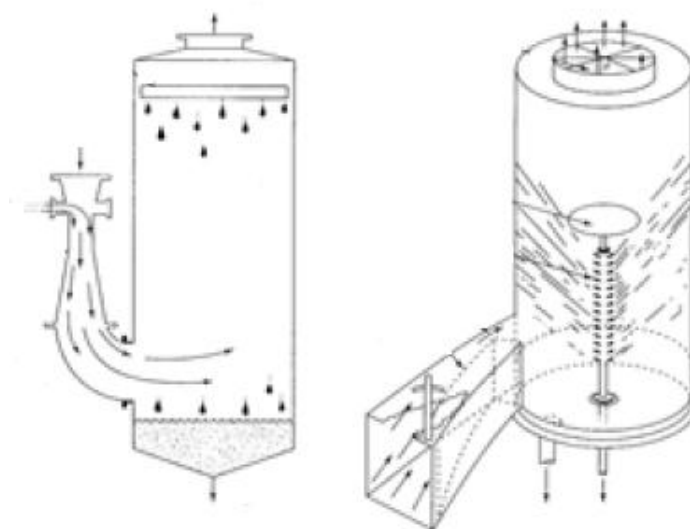


Figura 2.11 Torre de lavagem e lavador com efeito venturi [5]

Os colectores húmidos são muito eficientes quando é tratado ar com partículas de grande dimensão. Só os lavadores com efeito venturi têm a capacidade de recolher partículas de menor dimensão ($< 2 \mu\text{m}$) mas é acompanhado com um consumo maior devido a velocidades de entrada mais elevadas. No ambiente doméstico, os colectores húmidos apresentam uma viabilidade restringida uma vez que as dimensões seriam demasiado grandes e pelo facto que a água teria de ser tratada depois de passar pelo colector.

2.5.7 Comparação entre separadores de gases

A Tabela 2.3 descreve de forma resumida as características principais dos separadores de gases anteriormente apresentados de forma a facilitar uma comparação entre estes.

Tabela 2.1 Características principais dos separadores de gases

	Camaras de sedimentação	Ciclone	Colector dinâmico	Precipitadores Electrostáticos	Filtros de manga	Colectores húmidos
Tamanho de partículas removidas	$> 50 \mu\text{m}$	$> 4 \mu\text{m}$	$> 4 \mu\text{m}$	$> 0,01 \mu\text{m}$	$> 0,5 \mu\text{m}$	$> 0,5 \mu\text{m}$
Efeito da massa volúmica das partículas	Aumento da eficiência com aumento da massa volúmica	Aumento da eficiência com aumento da massa volúmica	Aumento da eficiência com aumento da massa volúmica	Sem efeito na eficiência	Sem efeito na eficiência	Pouco efeito na eficiência
Perda de carga	Baixa	Elevada	Elevada	Baixa	Medio	Medio
Custo	Baixo	Baixo	Medio	Elevado	Elevado	Elevado
Manutenção	Baixa	Baixa	Controlo do ventilador	Limpezas frequentes	Limpezas frequentes	Tratamento da água
Espaço requerido	Elevado	Baixo	Baixo	Elevado	Elevado	Medio

Assim conclui-se que, para a utilização do separador de gases no âmbito doméstico, o Ciclone apresenta as melhores características. A elevada perda de carga, que vai impor a utilização de um ventilador mais potente, é compensado pelo baixo custo, a pouca necessidade de manutenções e o espaço mínimo necessário.

2.6 Estudo teórico sobre ciclones

De forma entender melhor o comportamento de uma partícula num ciclone e a sua interação com o escoamento é necessário realizar um estudo pormenorizado.

Se admitimos que um corpo circular se movimenta isolado num trajeto circular com um raio r e uma velocidade U sabemos que a partícula vai estar sujeito a uma força centrípeta F_c , força de arrasto F_d e uma impulsão F_b .

A força centrípeta é dada por:

$$F_c = \frac{mU^2}{r} = m\omega^2 r = \frac{4}{3} \pi \rho r_p^3 \frac{U}{r} \quad (2.1)$$

Assumindo que o escoamento do fluido gasoso se movimenta num trajeto em forma de espiral sabemos que a velocidade do fluido pode ser partida em duas componentes: uma componente tangencial U_t e uma componente de velocidade radial U_r . Segundo a lei de Stokes, a força de arrasto de qualquer partícula no escoamento é dado por:

$$F_d = 6\pi r_p \mu U_r \quad (2.2)$$

A impulsão é a força hidrostática resultante exercida de um fluido sobre um objecto o que no nosso caso se demonstra na diferença de densidades da partícula e do fluido:

$$F_b = -U_p \rho_f \frac{U_t^2}{r} = -\frac{4}{3} \pi \rho r_p^3 \frac{U_t^2}{r} \rho_f \quad (2.3)$$

O balanço das forças é simplesmente a soma destas três forças:

$$\frac{d_r}{d_t} = F_c + F_d + F_b \quad (2.4)$$

Esta razão constata que a reação da partícula depende do seu tamanho o que significa que uma partícula pequena vai se movimentar em direção ao centro do ciclone enquanto que uma partícula maior vai movimentar-se para uma trajetória mais perto das paredes até haver um balanço entre as três forças. Portanto num sistema estacionário assumimos que a soma destas forças vai dar zero.

$$F_c + F_d + F_b = 0 \quad (2.5)$$

O que se traduz em:

$$\frac{4}{3} \pi \rho_p r_p^3 \frac{U}{r} + 6 \pi r_p \mu U_r - \frac{4}{3} \pi \rho_p r_p^3 \frac{U_t^2}{r} \rho_f = 0 \quad (2.6)$$

Se rearranjarmos este termo em ordem do raio da partícula sabemos que o raio da partícula em função do raio do ciclone, massa volúmica do escoamento e a velocidade tangencial e radial é dado por:

$$r_p = 3 \left(\frac{\mu U_r r}{2 U_t^2 (\rho_p - \rho_f)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

Testes experimentais deduziram que a velocidade rotacional é proporcional a r^2 . Isso significa que a velocidade de entrada controla as característica dos vórtices e a velocidade para um raio arbitrário é igual a:

$$U_{r_i} = U_{ep} \frac{r_i}{r} \quad (2.8)$$

Normalmente, a geometria de um ciclone por norma é apresentado de forma adimensional, quer dizer, em relação ao diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone D . Existem diversos estudos para diferentes tipos de geometrias em que os ciclones de Stairmand, Lapple e Swift apresentaram os melhores resultados em termos de eficiência (alta taxa de separação de partículas) e rendimento (boa separação de partículas e baixa perda de carga) cuja geometria pode ser vista na Tabela 2.4. Estes distinguem-se na geometria de diferentes partes do ciclone em relação com o diâmetro do cilindro do ciclone. Os mais utilizados na indústria são os ciclones do tipo Stairmand que dão uma grande importância à altura do ciclone ($1.5 * D$) e o diâmetro de saída D_e ($0.5 * D$).

Tabela 2.4 Geometrias padrão de diferentes tipos de ciclones industriais [8]

	Stairmand	Stairmand	Lapple	Swift	Swift	Swift
função	Alta eficiência	Alto rendimento	propósito geral	Alta eficiência	propósito geral	Alto rendimento
D	1	1	1	1	1	1
a/D	0,5	0,75	0,5	0,44	0,5	0,8
b/D	0,2	0,375	0,25	0,21	0,25	0,35
De/D	0,5	0,75	0,5	0,4	0,5	0,75
S/D	0,5	0,875	0,625	0,5	0,6	0,85
h/D	1,5	1,5	1	1,4	1,75	1,7
H/D	4	4	4	3,9	3,75	3,7
B/D	0,375	0,375	0,25	0,4	0,4	0,4

A maior desvantagem neste equipamento é a alta perda de carga que ocorre especialmente com um aumento da velocidade do fluido. Estudos na literatura analisaram diversos aspectos do funcionamento dos separadores ciclônicos. Um destes estudos consistiu na análise da perda de carga de 3 ciclones de tamanho diferente, utilizando a modelação numérica onde foi dado o foco na perda de carga e na determinação da eficiência. A Figura 2.12 demonstra o incremento quadrático da perda de carga com o aumento linear da velocidade.

Destaca-se ainda uma relação entre a perda de carga e o tamanho do ciclone. Aqui, o ciclone com a maior perda de carga é o ciclone de maior tamanho (Ciclone III) e o aumento na perda de carga pronuncia-se mais neste comparado com os outros dois. No que diz respeito ao perfil de pressões destaca-se o facto de a zona de baixa pressão se encontrar no centro do ciclone, na zona em que se forma o vórtice interior ascendente.

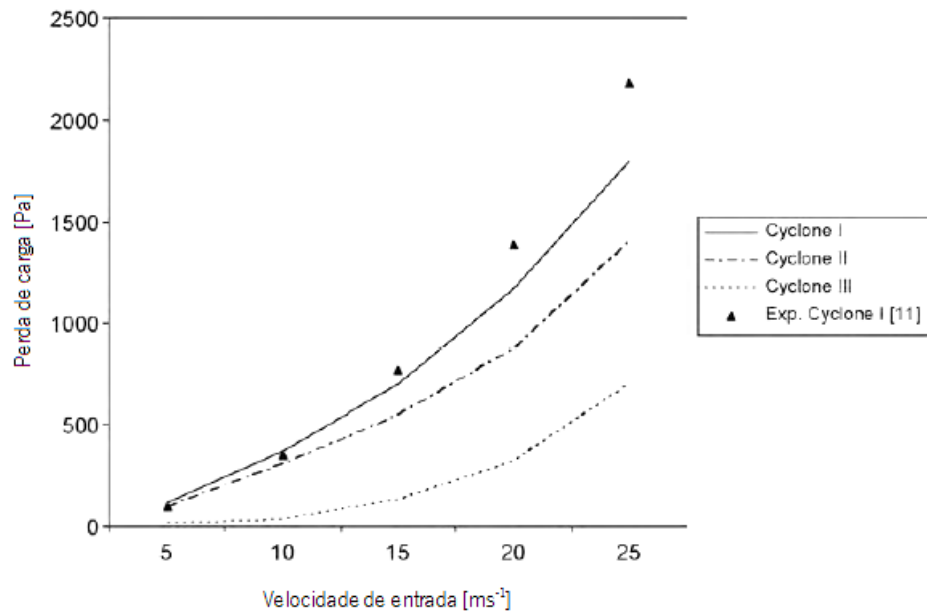


Figura 2.12 Relação perda de carga e velocidade de entrada - 3 ciclones de tamanho diferente [7]

No caso de uma aplicação num domínio doméstico este tipo de equipamento é o mais viável e interessante a estudar devido à sua simplicidade em termos de construção e baixo custo. É esperado que um ciclone de dimensão razoável alcance uma separação de partículas desejável e que possa ser adicionado a uma caldeira a pellets com facilidade.

3. Computação dinâmica

3.1 Ansys FLUENT

O *Ansys FLUENT* é um software de computação dinâmica poderosa que permite, entre outros, a modelação física de turbulência, transferência de calor, reações para aplicações industriais e modelos de escoamentos. A integração da Workbench permite que todos os passos num estudo de computação possam ser realizados no mesmo programa. O *Ansys* permite a execução de desenhos com a utilização da ferramenta CAD. Seguidamente a plataforma permite a criação de malha com a opção de criar zonas de refinação da mesma. Após a solução do modelo numérico criado, a solução é obtida usando o software CFD, *FLUENT* integrado no software. Consequentemente, é possível realizar análises paramétricas e a visualização dos resultados.

3.2 Modelação matemática do escoamento turbulento

Como já foi referido anteriormente, o escoamento no interior do ciclone é muito complexo e de estudo dificultado. As inúmeras complicações práticas na simulação numérica explicam-se pelo facto do fluxo ser de uma anisotropia elevada.

Para um escoamento turbulento em estado estacionário as equações de Navier-Stokes podem ser apresentadas como [7]:

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.1)$$

em que,

U - velocidade do fluido (ms^{-1});

P - pressão (Pa);

ρ - massa volúmica (kgm^{-3});

μ - viscosidade dinâmica ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$);

e

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \quad (3.2)$$

descreve o efeito das turbulências no escoamento.

3.3 Modelo de turbulência

No regime da computação dinâmica de fluidos é de grande importância uma descrição adequada do movimento turbulento do fluido. É um facto que não existe um modelo padrão que seja adequado para todos os tipos de problemas. Existe um número considerável de modelos de turbulência que têm de ser considerados e analisados por sua viabilidade na resolução de um dado problema. A escolha de um modelo de turbulência depende de certas ponderações a fazer como:

- Parâmetros físicos englobados no escoamento do fluido;
- Nível de precisão desejado;
- Recursos computacionais presentes;
- Tempo disponível na execução da simulação;

No *FLUENT* existem diversos tipos de modelos que são aplicáveis para o problema atual. Destacaram-se 3 tipos de modelos de turbulência que se encontram dentro dos parâmetros exigidos:

- O modelo Standard $k - \epsilon$;
- O modelo de grupo de renormalização (RNG) $k - \epsilon$;
- O modelo de tensão de Reynolds (RSM);

Modelo Standard $k - \varepsilon$

Este modelo de turbulência mais simples compõe-se de um modelo de duas equações para adquirir a resolução das propriedades do escoamento a analisar. Este destaca-se por seu vigor, o seu tempo de cálculo económico e um nível de precisão razoável numa vasta gama de escoamentos turbulentos.

Este modelo semi-empírico baseia-se nas equações de transporte para a energia cinética turbulenta k e a taxa de dissipação ε . A equação de transporte do modelo para k é uma derivada da equação exacta enquanto a equação do modelo para ε é obtida com um certo raciocínio físico e tem pouca semelhança com a sua exacta contrapartida matemática. É importante de referir que este modelo não engloba os efeitos da viscosidade molecular logo este é só valido para escoamentos totalmente turbulentos.

Seguidamente realizou-se o desenvolvimento de novos modelos com o foco no aperfeiçoamento do desempenho. Assim surgiu uma extensão do modelo standard obtendo o modelo de grupo de renormalização (RNG) $k - \varepsilon$.

Modelo de grupo de renormalização (RNG) $k - \varepsilon$

Este modelo de turbulência resultou de uma técnica estatística rigorosa que é análogo ao modelo referido anteriormente mas com algumas afinações. A equação do modelo para ε tem um termo adicional que aumenta a precisão e tempo de cálculo significativamente, o efeito de um vórtice no escoamento turbulento esta incluído, engloba uma fórmula analítica para o número de Prandlt no regime turbulento (no modelo anterior era considerado constante) e não despreza a viscosidade molecular que tem um peso significativo em regimes com um número de Reynolds menor.

Estas mudanças tornam o RNG num modelo mais preciso e com uma gama de aplicação mais ampla. O nome vem de uma técnica matemática designada por “grupo de renormalização” que foi aplicada nas equações de Navier-Stokes. A derivação analítica resultou num modelo com constantes distintos do modelo Standard $k - \varepsilon$, termos e funções adicionais nas equações de transporte de k e ε .

Modelo de tensão de Reynolds (RSM)

O RSM (Reynolds Stress Models) é o modelo mais elaborado que o *FLUENT* permite utilizar. Este engloba equações para determinar o tensor de tensão de Reynolds. Isso significa que em aplicações em 2D 5 equações terão de ser calculadas e em 3D são 7 equações adicionais. O RSM abrange os efeitos de curvatura, rotação e mudanças severas no escoamento de uma forma mais precisa, que um dos modelos referidos anteriormente conseguisse. Logo é um modelo adequado quando se trata de um escoamento mais complexo como por exemplo uma passagem de fluxo rotativa. Porém é importante ter em conta um maior tempo de cálculo computacional que, dependendo do caso, não justifica a sua aplicação. No caso presente será o modelo mais adequado, uma vez que o escoamento no interior do ciclone é turbulento e sofre grandes alterações devido a geometria do ciclone que induz dois movimentos complexos, um helicoidal descendente e helicoidal ascendente no sentido invertido. De acordo com os pressupostos das equações de transporte o RSM pode ser descrito como [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = & \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + \rho \left(\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}} \right) \\ & - 2\mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (3.3)$$

em que μ_t é dado por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

e

$$C_\mu = 0,99 \quad (3.5)$$

3.4 Opções avançadas do Reynold Stress Model

O Reynold Stress Model no *FLUENT* como modelo de turbulência apresenta um número de constantes, que podem ser alterados, e opções adicionais para que permitem ao operador avançado realizar ajustes conforme as necessidades na resolução do problema. No caso presente temos a simulação do escoamento, dos gases de escape, no interior do ciclone e a simulação do movimento de partículas inseridas no anterior. Logo foi dada uma grande importância de incluir os efeitos de reflexão de partículas na parede (*Wall Reflection Effects*).

Em relação as constantes das equações no RSM não foram realizadas alterações e os valores podem ser observados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Constantes do RSM no *FLUENT*

C1-Epsilon	1.44	C2-Epsilon	1.92
C1-PS	1.8	C2-PS	0.6
C1'-PS	0.5	C2'-PS	0.3
TKE Prandtl Number	1	TDR Prandtl Number	1.3
Cmu	0.09		

O *FLUENT* disponibiliza 3 funções para o procedimento da simulação na região perto das paredes. O primeiro são as *Standard Wall Functions* em que a região perto das paredes é tratada conforme o restante escoamento, portanto não é dado um cuidado adicional as forças de araste que nesta zona têm um maior peso (aumento considerável da velocidade do escoamento da parede em direção ao centro do escoamento). As próximas funções disponíveis são o *Non-Equilibrium Wall Functions* que, na região da parede, presta conta ao efeito da alteração das pressões na distorção dos perfis de velocidade, uma vez que, nestas regiões o conceito de um equilíbrio local não é válido. Basicamente divide a região numa subcamada viscosa e uma camada superior em regime totalmente turbulento.

As *Standard Wall Functions* dão resultados razoáveis para a maioria dos escoamentos. As *Non-Equilibrium Wall Functions* ainda estendem as capacidades dos anteriores e para o estudo apresenta as características mais favoráveis. No fim temos, o chamado *Enhanced Wall Treatment*, que engloba a divisão da região em duas camadas conforme a função anterior com funções mais pormenorizadas. Com uma malha fina nas paredes esta função e as *Non-Equilibrium Wall Functions* vão ter resoluções quase idênticas. Contudo uma malha demasiado fina e a resolução da mesma depende das capacidades computacionais disponíveis que nem sempre existem e que torna o *Enhanced Wall Treatment* numa opção favorável. No caso presente as *Non-Equilibrium Wall Functions* encontram-se na resolução pretendida uma vez que se vai dar um ênfase na criação de uma malha fina nas paredes.

3.5 Interação fluido partículas

Em adição de resolver o movimento turbulento do fluido o *FLUENT* permite a simulação do movimento de partículas (Discrete Phase Model ou DPM). Para o problema dado as funções mais importantes são o cálculo do arraste hidrodinâmico, a força de gravidade sobre as partículas e a interação das mesmas com as paredes. O operador tem diversas formas de analisar o movimento de partículas. O *FLUENT* possibilita a análise da reação de só uma partícula, de uma nuvem de partículas de mesmo ou distinto tamanho. Assim sendo ainda é necessário estabelecer outras variáveis como a massa volúmica, geometria etc. O procedimento interno de simulação no *FLUENT* consiste primeiro na simulação do movimento do fluido dentro de dada geometria e seguidamente no movimento das partículas com base no movimento do fluido.

3.6 Simulação dinâmica

Realizou-se uma análise teórica da eficiência de 3 diferentes ciclones, um teste de cinzas recolhidas de uma caldeira a biomassa de forma determinar a massa volúmica da mesma, e finalmente o estudo computacional de ditos ciclones de forma encontrar o mais adequado para a produção de um protótipo.

3.6.1 Geometria

Os ciclones do tipo Stairmand são os mais simples e mais utilizados na indústria. Esses têm uma definição clara em termos de dimensões dos diferentes componentes normalmente referenciados ao diâmetro exterior D do ciclone. As dimensões relativas dos ciclones tipo Stairmand [3] de alta eficiência são:

$$a = S = D_e = 0.5D, \quad b = 0.2D, \quad h = 1.5D, \quad H = 4D \text{ e } B = 0.375D \quad (3.6)$$

Na Figura 3.1 encontram-se as principais características geométricas de um ciclone Stairmand que serviram de base aos casos estudados.

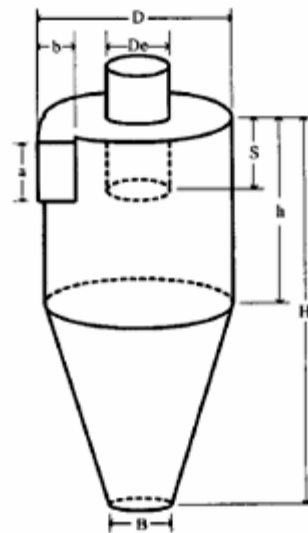


Figura 3.1 Ciclone tipo Stairmand [10]

Atendendo que o ciclone a estudar será construído para o uso no sector doméstico, existem diversas limitações que têm de ser consideradas. O diâmetro de uma chaminé standard encontra-se entre os 80 - 90 mm e é por essa razão que o diâmetro do orifício de saída superior (D_e) não deve exceder este valor.

Foram desenhados três ciclones: o Ciclone A cujo diâmetro de saída é coincidente com o da chaminé standard (80 mm), o Ciclone B cujo diâmetro exterior é superior ao Ciclone A e o Ciclone C cujo diâmetro é inferior. As medidas dos três ciclones encontram-se sumariadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Dimensões geométricas dos 3 ciclones

Dimensões (mm)	Ciclone A	Ciclone B	Ciclone C
D	160	200	120
D_e	80	100	60
a	80	100	60
b	32	40	24
S	80	100	60
H	640	800	480
h	240	300	180
B	60	75	45

3.6.1.1 Eficiência de separação – aproximação teórica

Utilizando os parâmetros geométricos destes três ciclones realizou-se um estudo teórico da eficiência de separação antes de prosseguir com a análise computacional. Desta forma torna-se possível ganhar uma ideia do comportamento dos ciclones e, de certa forma, um primeiro indicador para a escolha.

A solução teórica da eficiência de separação em ciclones abrange o cálculo do diâmetro da partícula a qual se obtêm uma probabilidade de filtração de 50%, o assim chamado “*Theoretical Cutoff Diameter*”. Compreende-se ainda que partículas de maior diâmetro têm uma maior probabilidade de serem capturados e observa-se o inverso para partículas de menor diâmetro. Na generalidade obtêm-se, para um ciclone industrial, um *Cutoff Diameter* entre os 3 - 8 μ m o que significa que eficiência de um ciclone é superior à das câmaras de sedimentação gravítica mas inferiores à dos precipitadores electrostáticos.

Na literatura encontra-se informação em abundância sobre trabalhos teóricos e experimentais e o grande interesse é de saber se é possível obter uma fórmula simples de forma facilitar o projeto de ciclones. Infelizmente existe uma discrepância entre as teorias existentes e os dados experimentais, logo é importante de determinar a equação adequada em consideração com a aplicação. A equação utilizada para o cálculo do *Cutoff Diameter* dos 3 ciclones foi a desenvolvida de Stairmand e Barth [10]:

$$Dp_{50} = \frac{3}{U_{t\ max}} \sqrt{\frac{\mu Q}{\pi \rho C (H - S)}} \quad (3.7)$$

em que,

μ – viscosidade dinâmica dos gases ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$);

Q – caudal de entrada (m^3s^{-1});

ρ – massa volúmica das partículas (kgm^{-3});

C – Factor de correção de Cunningham

H – altura do ciclone (m);

S – comprimento do cilindro interior de separação (m);

Stairmand e Barth consideraram a geometria, nomeadamente a altura total (H) e o comprimento do cilindro interior de separação (S), na equação (2.9) de forma que maior a diferença entre eles menor será o diâmetro. A equação (2.9) considera a massa volúmica das partículas (ρ_p) e a viscosidade dinâmica dos gases (μ) em que um aumento da primeira beneficia a eficiência e um incremento do segundo causa uma perda na eficiência. A velocidade máxima dos gases ($U_{t\ max}$) também se encontra na fórmula e é definido como:

$$U_{t\ max} = 6.1 * U_e * \left(\frac{ab}{D^2}\right)^{0.61} * \left(\frac{D_e}{D}\right)^{-0.74} * \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.33} \quad (3.8)$$

em que,

U_e - velocidade dos gases à entrada do ciclone (ms^{-1});

a, b - altura e largura da secção da entrada respectivamente (m);

D – diâmetro da secção cilíndrica exterior (m);

D_e – diâmetro da secção de saída (m);

Estudos revelaram que esta aproximação é a mais adequada para ciclones de dimensão inferior. Utilizando velocidades entre os 10 a 25 m.s^{-1} , realizou-se um estudo teórico dos 3 ciclones projetados com os resultados expostos na Figura 3.2.

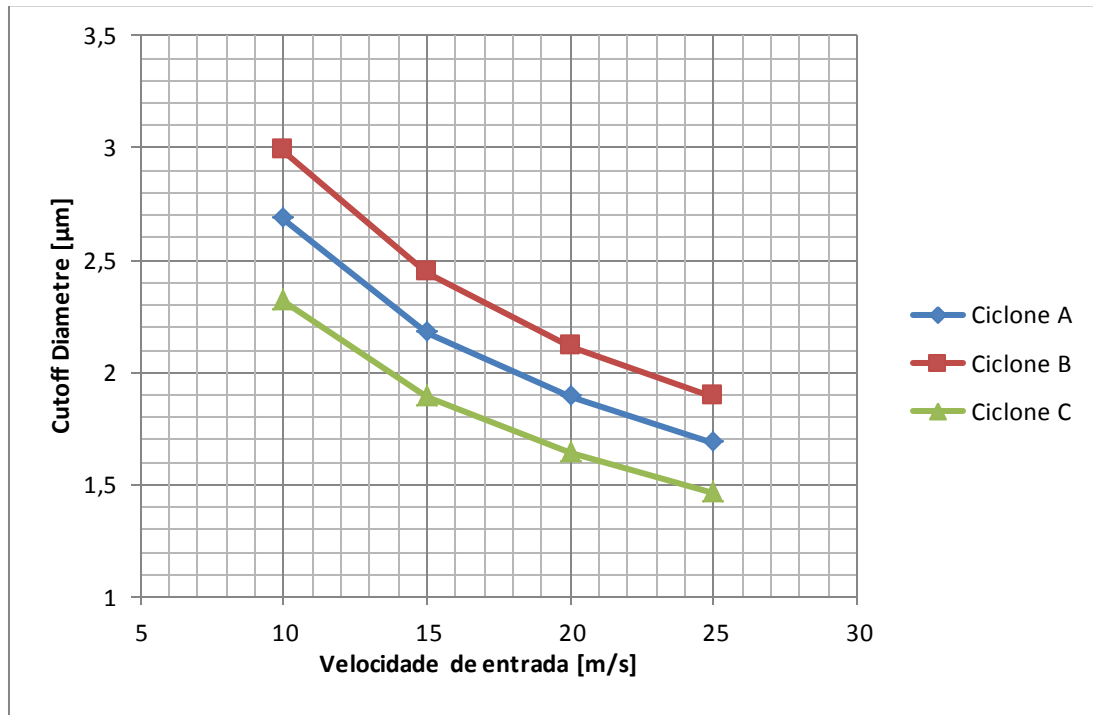


Figura 3.2 Influência da velocidade de entrada no *Cutoff Diameter*

Na figura observa-se que um aumento da velocidade de entrada dos gases de escape conduz uma diminuição do *Cutoff Diameter*. Quando comparamos o comportamento dos três ciclones observamos que o Ciclone C supere o Ciclone A e B em termos de eficiência de separação independentemente da velocidade do fluido. Logo conclui-se que com uma diminuição de dimensão do ciclone obtemos um menor *Cutoff Diameter* e uma eficiência de separação de partículas maior. A figura ainda indica que cada ciclone tende para uma eficiência máxima (*Cutoff Diameter* mínimo) que não se vai alterar com um incremento na velocidade de entrada. A diferença entre os ciclones, a partida, vai-se manter. Esta primeira análise aponta para o Ciclone C para a realização de testes mas só com a computação dinâmica obtém-se informações sobre outras características do escoamento como a perda de carga e o perfil de escoamento.

3.6.2 Malha

Para garantir uma boa qualidade dos resultados e que estes sejam representativos das condições estudadas é importante ter uma malha bem definida e fina. Esta afirmação torna-se ainda mais legítima quando nos recordamos que o escoamento a ser estudado é turbulento. É por isso que foram realizadas diversas refinações da malha, nomeadamente em redor de todo o corpo do ciclone, ou seja, em todas as zonas que representam as paredes do ciclone. Portanto, a partir das paredes do ciclone para o interior existe um incremento no tamanho das células, elementos tetraédricos, por um factor de 1.1. Esta medida justifica-se com a importância da evolução do escoamento a partir da parede do ciclone e o cálculo matemático exigente. Outro aspecto é o cálculo do movimento das partículas no fluido e as suas interações com a parede. Uma outra refinação efectuada na malha encontra-se na entrada do ciclone. Assim é assegurado que o cálculo em relação ao desenvolvimento do perfil de velocidade no início seja o mais realista possível. Os ciclones A,B e C têm malhas de 1 725 862, 1 681 475, 1 561 951 elementos respectivamente. O Ciclone A com e sem malha pode ser visto na Figura 3.3.

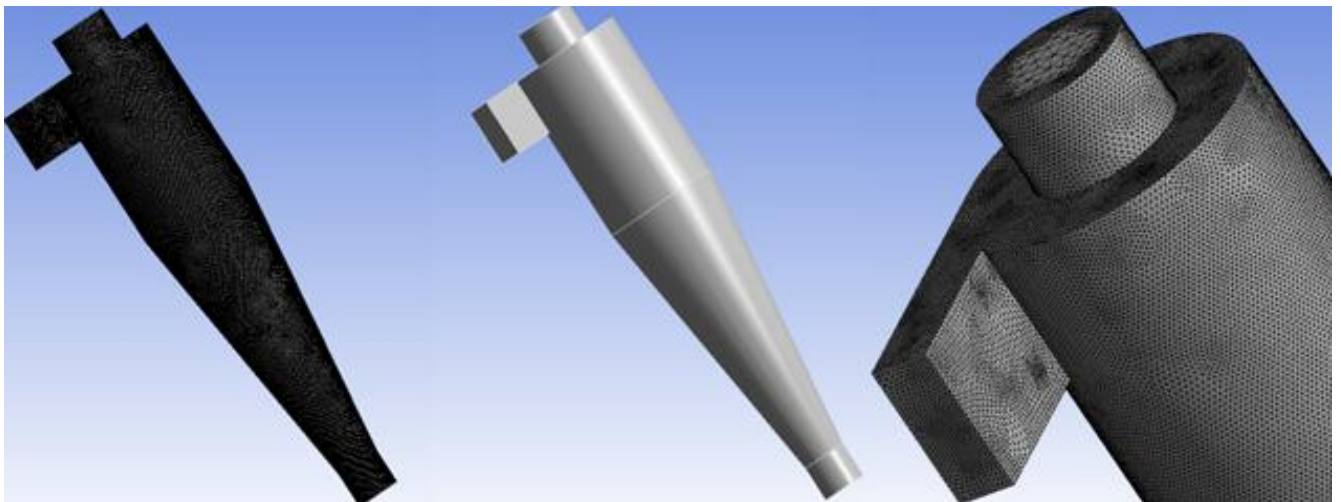


Figura 3.3 Ciclone A com e sem malha

3.6.3 Condições de fronteira

De forma a aproximar a simulação a um caso real, é importante que as condições de fronteira (temperatura dos gases, viscosidade dinâmica etc.) inseridas no *FLUENT* sejam iguais às condições encontradas na realidade. Admite-se uma temperatura de 150°C na entrada do ciclone. No caso real as temperaturas dos gases de escape das caldeiras situam-se entre os 100°C e 200°C, logo utilizou-se a média dos dois valores. Então, à partida sabe-se que ar com uma temperatura de 150°C vai ter uma viscosidade dinâmica de $2.3 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$.

Cada simulação inclui o cálculo da interação de 7 grupos de partículas. Os grupos distinguem-se no diâmetro das partículas (1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 μm) e cada grupo tem um número de partículas entre os 600 e 1000 dependendo da malha de cada ciclone, uma vez que temos uma partícula para cada elemento de malha da superfície de entrada (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 Número de partículas inseridas no escoamento por ciclone

	Partículas por grupo	Numero total de partículas
Ciclone A	992	6944
Ciclone B	832	5824
Ciclone C	608	4256

Cada partícula tem três modos de interagir com as paredes do ciclone. A saída superior é indicada como um *outflow*. As partículas que atravessam essa secção são identificadas como não separadas do escoamento. As partículas que passam pela saída inferior são identificadas como retidas e separados do escoamento dos gases de escape. As partículas ao interagir com as restantes paredes batem nessas de forma permanecer no escoamento.

Foram realizadas nove simulações, três para cada ciclone. Os dados referidos anteriormente são iguais em cada uma delas e são considerados constantes durante o cálculo. Para cada ciclone foram realizadas simulações com velocidades de entrada de 10, 15 e 20 m.s⁻¹.

Para a massa volúmica das partículas realizou-se um teste no Departamento de Mecânica conforme pode ser visto no anexo A. O valor introduzido no *FLUENT* é 1519,2 kg.m⁻³.

Para a simulação foi utilizado um computador com um processador de 2.66 GHz e 4 GB de RAM.

4. Instalação experimental

4.1 Determinação de perda de carga

Foi desenhado uma instalação experimental para o ensaios de testes de perda de carga para o ciclone escolhido após análise de resultados do software. O teste consiste em ligar o ciclone ao ventilador e medir a pressão tanto na entrada do ciclone como na saída superior do ciclone. A perda de carga é a diferença entre essas duas pressões que vai variar com a velocidade do ar que entra no ciclone. Conhecendo a secção de entrada do ciclone, as características do ar à temperatura ambiente (condições do teste) e as pressões medidas na entrada e na saída superior do ciclone consegue-se determinar a velocidade de entrada e caudal.

Recorrendo as equações de Bernoulli sabemos que,

$$\frac{U_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{U_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \quad (4.1)$$

em que,

p_i – pressão estática no ponto i (Pa);

ρ – massa volúmica (m^3s^{-1});

U_i – velocidade do fluido no ponto i (ms^{-1});

z_i – altura no ponto i (m);

g – aceleração gravítica (ms^{-2});

admitindo que o $i=1$ é na entrada do ciclone onde são realizado as medições e o ponto $i=2$ é pouco antes da entrada do ventilador sabemos que $U_2=0$ e $p_2=0$. Ainda se pode desprezar as alturas z_1 e z_2 . Portanto, transformando a equação com p_1 num lado obtém-se,

$$p_1 = \rho \frac{U_1^2}{2} \quad (4.2)$$

Logo a velocidade na secção medida é dado por,

$$U_1 = \sqrt{\frac{2p_1}{\rho}} \quad (4.3)$$

com o calculo da velocidade podemos determinar o caudal que é dado por,

$$Q = U(a * b) \quad (4.4)$$

em que,

Q – caudal mássico (m^3s^{-1})

4.2 Equipamento e instalação experimental

A instalação experimental por si é muito simples. O equipamento experimental foi instalado nas oficinas do no Laboratório de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho e consta dos seguintes elementos, conforme o esquema apresentado na Figura 4.1:

- Ventilador (1)
- Ciclone (2)
- Manómetro Digital na entrada do ciclone (3)
- Manómetro Digital na saída do ciclone (4)

O ventilador, que tem uma saída superior com um diâmetro normalizado, esta ligado por uns tubos e a transição II (anexo B) ao ciclone. As medições de pressão são realizadas com o manómetro digital na entrada e saída do ciclone previamente preparados.

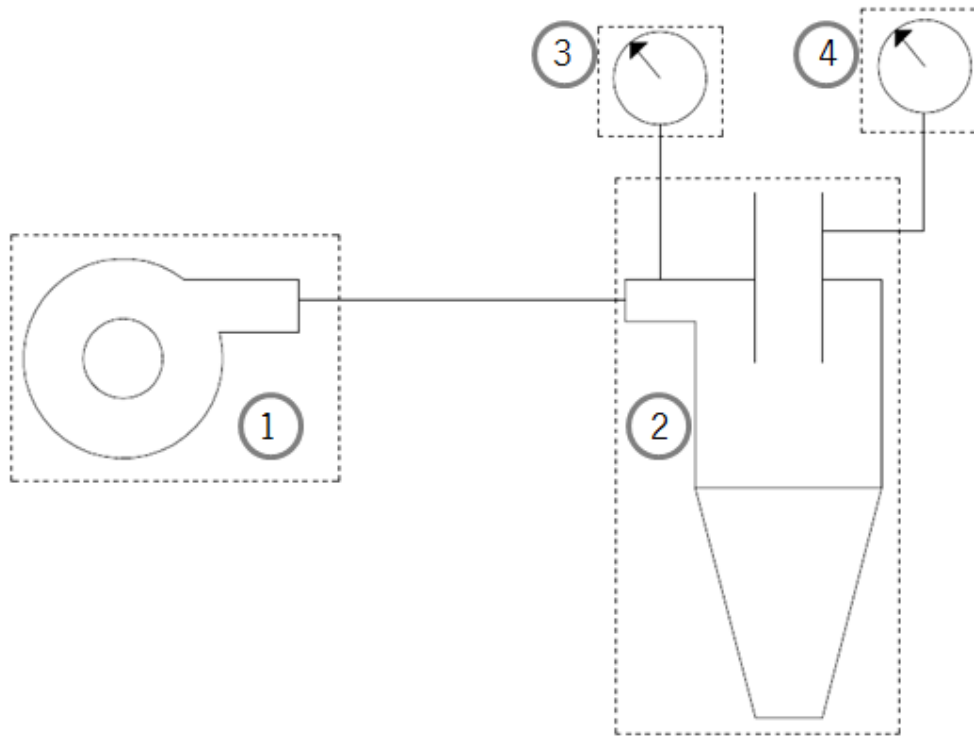


Figura 4.1 Esquema da instalação experimental

Ciclone

O ciclone fabricado é composto em chapa de aço inoxidável com uma espessura de 1.5 mm. Para realizar as medições de perda de carga foi necessário fazer dois furos no ciclone. O primeiro, na secção rectangular onde o ar, após a passagem do ventilador, entra e o segundo na saída circular superior. Foi ainda dado um grande cuidado na eliminação de irregularidades na face do furo, uma vez que, turbulências geradas devido a irregularidades vão dar origem a um erro maior entre o valor medido e o valor real. Seguidamente colou-se, utilizando cola para metais, um tubo com o mesmo diâmetro do furo, na parte exterior do ciclone. Este tubo, na fase do teste, é ligado com um tubo flexível ao manómetro digital. O ciclone fabricado, antes e depois de ser preparado pode ser visto na Figura 4.2.



Figura 4.2 Ciclone fabricado antes e depois de preparações para experiências

Ventilador

O ventilador centrífugo utilizado é da marca Sodeca do modelo CA-142-2T-0,5 cujas características técnicas são apresentados no apêndice A (Figura 4.3).



Figura 4.3 Ventilador Sodeca modelo CA-142-2T-0.5

Manómetro Digital

O manómetro utilizado para realizar as medições de pressão é da marca LOVE Control, modelo HM28. Como pode ser observado na Figura 4.4, o manómetro possui duas entradas em que serão ligados os tubos utilizados na medição. Desta forma é possível, utilizando um tubo Pitot, medir a pressão total e estática. Sabendo que a pressão total é a soma da pressão estática e dinâmica é fácil de determinar a pressão dinâmica no ponto em que se encontra o tubo Pitot. No caso presente só será medida a pressão estática uma vez que é suficiente para determinar a perda de carga e as velocidades do ar.



Figura 4.4 Manómetro Digital – Marca: LOVE Control Modelo:HM28

Uma imagem da instalação pode ser encontrada na Figura 4.5.



Figura 4.5 Instalação experimental: Ventilador - Ciclone

5. Resultados e Discussão

5.1 Resultados Ansys FLUENT

Após realização das simulações pretendidas serão agora apresentados os resultados. No centro desse estudo encontra-se o perfil do escoamento com as velocidades atingidas em diversos pontos no ciclone, a perda de carga que ocorre entre a entrada do ciclone e a saída do mesmo e o movimento das partículas dentro do ciclone.

Como já referido anteriormente o escoamento no interior de um ciclone é bastante complexo. O perfil do escoamento é igual nos três ciclones e só se distingue nas velocidades. No início temos uma aceleração dos gases até se iniciar o movimento descendente. Nesta zona, em que se obtém a velocidade máxima, são alcançadas velocidades por volta de 25 a 30% maiores que a velocidade na entrada. Seguidamente observa-se que a velocidade diminui no movimento descendente e também na deslocação ascendente (vórtice exterior e interior). Em qualquer uma das simulações, a velocidade na saída superior do ciclone era de 10 m.s^{-1} ou menor. É de apontar que no interior do vórtice ascendente, na zona central do ciclone, a velocidade do ar é igual à zero. Esta zona neutra no interior não é afectada pelo escoamento, quer dizer, o escoamento não atravessa este espaço. Logo as extremidades deste espaço indicam o aspeto do vórtice interior ascendente e a sua configuração.

O perfil do escoamento é demonstrado no exemplo do ciclone B a uma velocidade de entrada de 20 m.s^{-1} na Figura 5.1.

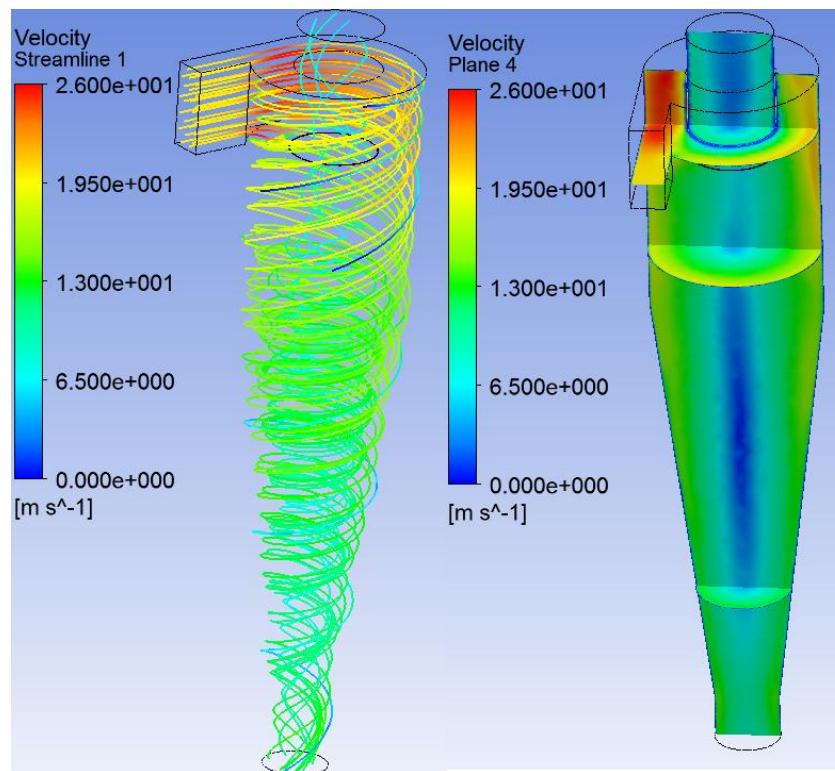


Figura 5.1 Perfil de escoamento do Ciclone B a uma velocidade de entrada de 20 m.s⁻¹

Observando a Figura 5.2, em que são representados os contornos da magnitude das velocidades dos ciclones A,B e C, e com o conhecimento à base da Figura 5.1, que nos indica a formato dos dois vórtices, torna-se possível fazer anotações sobre cada um dos vórtices. Como referido anteriormente temos uma aceleração na entrada do ciclone. No momento em que se inicia o movimento rotativo ascendente, aponta-se que o vórtice exterior tem uma velocidade inferior à velocidade de entrada mas até chegar ao fundo do ciclone, perto da saída inferior, esta mantém-se constante. O mesmo destaca-se para o vórtice interior ascendente cuja velocidade também é constante mas tem um valor inferior. Portanto as duas maiores perdas, em termos de velocidades (desacelerações), ocorrem após a aceleração inicial, quando o movimento descendente do escoamento se inicia, e na passagem, no fundo do ciclone, de um vórtice para o outro. Logo podemos concluir que a perda na energia cinética do escoamento se deve devido as bruscas alterações no sentido do movimento do escoamento.

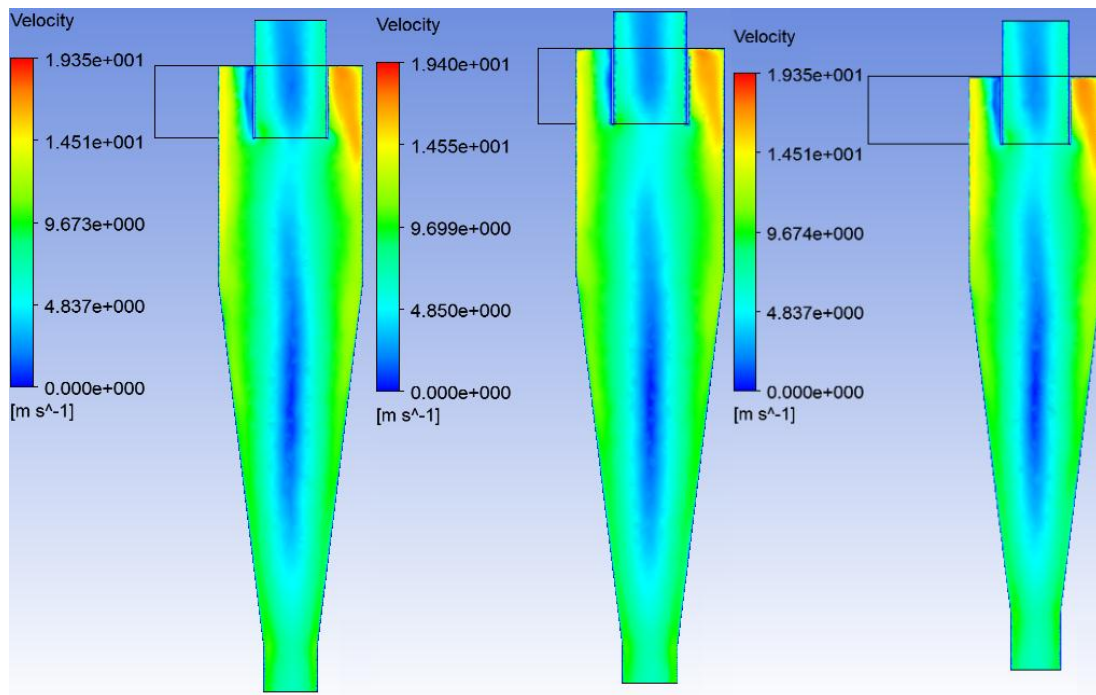


Figura 5.2 Contornos da magnitude das velocidades no Ciclone A,B e C a uma velocidade de entrada de 15 m.s^{-1} no plano XY

A perda de carga, por definição, é a energia perdida por unidade de peso do fluido quando escoar. Esta perda de energia explica-se pela fricção do fluido com as paredes que o rodeiam e a fricção entre as partículas do próprio fluido. Logo sabe-se que as características com maior influência na perda de carga são as propriedades do escoamento (velocidade, densidade etc.) e do equipamento (geometria, rugosidade das paredes etc.) que afecta o escoamento do fluido. Um escoamento no regime turbulento vai ter uma perda de carga maior que um escoamento num regime laminar devido ao movimento “desordenado”. A perda de carga do ciclone terá de ser compensada pelo ventilador logo uma perda de carga maior significa um consumo maior em termos energéticos.

Os resultados das simulações demonstram que a pressão estática é mais alta perto das paredes do ciclone e que diminui quanto mais se aproxima ao centro do eixo Y. Esta variação não é uniforme como pode ser observado na Figura 5.2. Existem três patamares de mesma pressão: o primeiro encontra-se nas paredes do corpo cilíndrico do ciclone. Esta zona tem a pressão estática mais elevada, desprezando a pressão mais elevada na zona da entrada dos gases de escape no ciclone. Seguidamente há uma região intermédia de baixa pressão. Estas duas zonas apresentam o vórtice exterior descendente. A região central, onde se encontra o vórtice ascendente e a zona neutra ($U=0$), é caracterizada pela pressão muito baixa que nos

limites verticais (saída superior e inferior) chega a valores negativos indicando a presença de um vácuo no escoamento. Antecipa-se que partículas que entram nestas duas zonas de pressão negativa, devido a sua posição no ciclone e as forças que nelas vão atuar, foram capturados (saída inferior) ou escaparam para o meio ambiente (saída superior).

O contorno da magnitude de pressão estática dos três ciclones, no plano XY, a uma velocidade de entrada de 15 m.s^{-1} pode ser visto na Figura 5.3. É de notar que com um aumento na velocidade de entrada obtém-se um aumento na perda de carga devido a maior turbulência no ciclone.

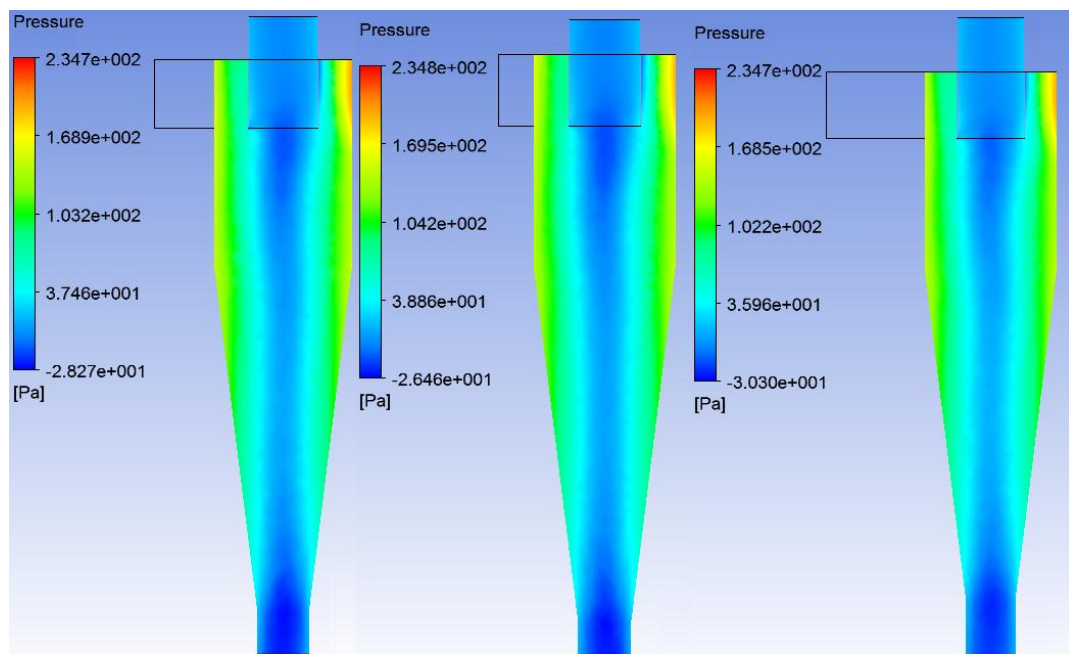


Figura 5.3 Contornos da magnitude da pressão estática no Ciclone A,B e C a uma velocidade de entrada de 15 m.s^{-1} no plano XY

É importante referir que um aumento da velocidade do fluido produz um grande aumento na perda de carga. Para a mesma velocidade há uma divergência mínima entre os três ciclones, como pode ser observado na Figura 5.4. A maior perda de carga, para a mesma velocidade, encontra-se no Ciclone C. Mas os outros dois ciclones projetados não estão muito longe deste valor o que pode ser explicado pela variação moderada do tamanho entre os três ciclones.

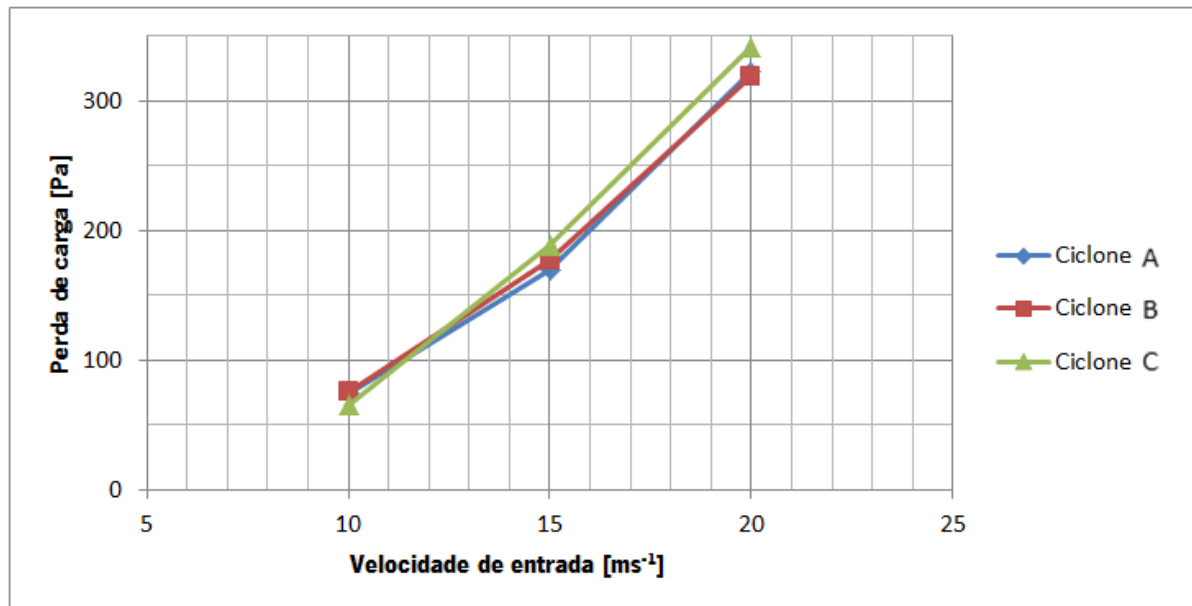


Figura 5.4 Perda de carga nos 3 ciclones para velocidade de entrada 10,15 e 20 m.s⁻¹

Todos os perfis de velocidades do escoamento e de pressão estática dos três ciclones encontram-se no anexo C.

A análise do movimento de partículas no *FLUENT* serviu para descobrir a probabilidade de captura de partículas de diversos diâmetros. Um grupo de partículas do mesmo diâmetro foi inserido na secção de entrada junto com grupos de partículas de outros diâmetros. As partículas desta forma interagem com o escoamento local e com partículas que eventualmente vão colidir. Desta forma, obteve-se o número de partículas, de mesmo diâmetro, que são capturados e os que seguem o escoamento pela saída superior. Sabendo o número de partículas em cada grupo é fácil determinar para cada diâmetro a probabilidade de captura. Pela análise teórica do *Cutoff Diameter* já efetuado prevê-se que vamos obter um aumento na eficiência, aumento na probabilidade de captura, com o aumento da velocidade e a diminuição do tamanho do ciclone.

Na Tabela 5.1 são apresentados as probabilidades de partículas de diâmetros diferentes para o Ciclone A à velocidades de entrada diferentes. A probabilidade de captura para o mesmo diâmetro aumenta com um aumento da velocidade conforme previsto. Significante é que o aumento da eficiência com o aumento da velocidade é mais pronunciado para partículas de diâmetro maior. No caso do Ciclone A obtemos uma

probabilidade de captura superior à 95% à 10 m.s^{-1} para um diâmetro de $10 \mu\text{m}$ enquanto para alcançarmos esta à 20 m.s^{-1} para um diâmetro de $4 \mu\text{m}$.

Tabela 5.1 Probabilidade de captura do Ciclone A para diâmetros e velocidades diferentes

	10 ms^{-1}	15 ms^{-1}	20 ms^{-1}
$1 \mu\text{m}$	74.6%	76.7%	79.7%
$2 \mu\text{m}$	76.9%	80.2%	83.9%
$3 \mu\text{m}$	78.5%	84.9%	92.2%
$4 \mu\text{m}$	83.9%	93.4%	99.5%
$5 \mu\text{m}$	89.8%	99.2%	99.9%
$10 \mu\text{m}$	99.9%	99.9%	-
$15 \mu\text{m}$	-	-	-

Pela comparação dos três ciclones às três velocidades de entrada estipuladas, observa-se e que o Ciclone C na generalidade tem uma eficiência maior comparando com os outros dois. Só quando se examina a percentagem de partículas de diâmetro menor ($1 \mu\text{m}$), o Ciclone A, independentemente da velocidade de entrada do escoamento, tem uma probabilidade maior que o Ciclone C. Na Figura 5.5 pode ser observado as probabilidades de captura para cada ciclone à uma velocidade de entrada de 10 m.s^{-1} .

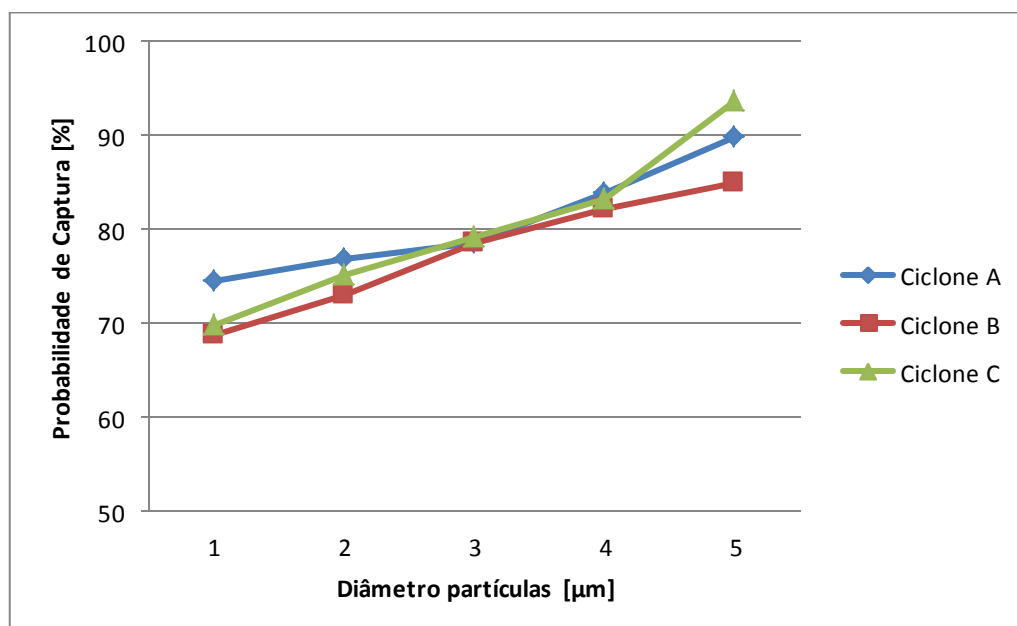


Figura 5.5 Probabilidade de Captura para Ciclone A,B e C a uma velocidade de entrada de 10 m.s^{-1}

Uma lista completa de tabelas das probabilidades de captura para os três ciclones às três velocidades e figuras de comparação podem ser encontradas no anexo C.

5.2 Resultados experimentais

O objetivo dos testes experimentais foi a determinação da perda de carga para o ciclone construído para distintas velocidades de ar. Foram realizados dois testes em que a pressão estática, na entrada do ciclone e na saída superior, foram medidas de forma a calcular a diferença entre eles e assim determinar a perda de carga no ciclone. Os resultados dos dois testes deram resultados muito semelhantes e o primeiro teste pode ser visto na Figura 5.6.

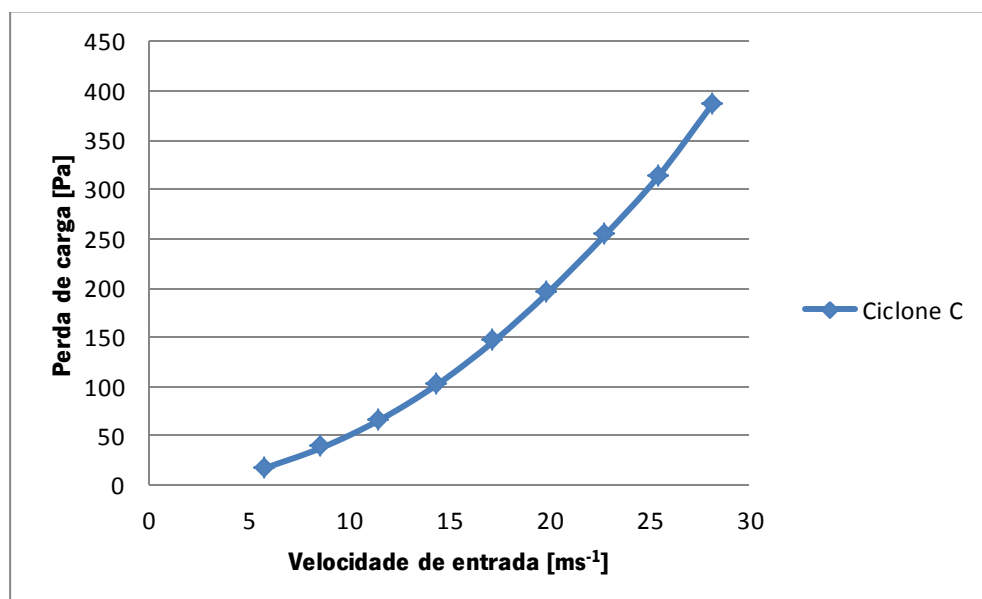


Figura 5.6 Valores experimentais da perda de carga em função da velocidade de entrada

Como se observa na Figura 5.6 existe um incremento da perda de carga no ciclone quando a velocidade de entrada é aumentada. Este incremento não ocorre de forma linear mas exponencial. Ainda é importante de notar que a partir de uma velocidade de entrada de 15 m.s⁻¹ começou-se a ouvir ruído do ciclone e a partir de uma velocidade de 20 m.s⁻¹ iniciou-se a vibração do próprio equipamento devido as turbulências e altas

velocidades no ciclone. Todas as figuras e tabelas realizadas dos testes realizados podem ser encontrados no anexo C.

5.3 Comparação de resultados

O objetivo desta simulação dinâmica foi a escolha de um dos três ciclones projetados para o fabrico e seguidamente para a realização de testes. O *Ansys FLUENT* é uma ferramenta da mecânica computacional muito poderosa, de uma complexidade elevada que possibilita uma melhor compreensão das ocorrências no interior do ciclone. A aplicação desejada, designadamente, o acoplamento de um ciclone a uma caldeira a pellets, traz certas limitações, particularmente nas dimensões do equipamento.

As simulações no *FLUENT* revelaram que em termos de perda de carga os três ciclones divergem pouco entre eles para a mesma velocidade de entrada. Dos três, o Ciclone B apresenta a menor perda de carga explicado pela maior dimensão. O Ciclone C, o mais pequeno, tem a maior perda de carga.

No que diz respeito a separação de partículas determinou-se que com um aumento da velocidade do escoamento aumentamos a eficiência do ciclone. Ainda sabemos que um ciclone com uma dimensão menor vai ter uma eficiência maior que um ciclone maior a idêntica velocidade. No cálculo do *Cutoff Diameter* de cada ciclone às três velocidades estipuladas confirmou-se essa afirmação. Logo em termos de eficiência de separação percebemos que o Ciclone C é melhor que os outros dois ciclones independentemente da velocidade dos gases de escape da caldeira. A simulação do movimento de partículas no *FLUENT* demonstrou que em termos de eficiência de separação os ciclones a testar para partículas de tamanho menor (1, 2 μm) não divergem muito entre si. Conclui-se que, em termos de eficiência geral, com o Ciclone C obtiveram-se os melhores resultados.

O Ciclone C tem a melhor eficiência de separação entre os três projetados. A perda de carga é a maior neste mas tendo em conta que a perda de carga entre os três ciclones é relativamente pequena, optou-se pelo Ciclone C para o fabrico e a realização de testes. Outro aspeto favorável na escolha do Ciclone C para o fabrico é o seu tamanho diminuto que, na perspectiva do acoplamento numa chaminé standard, facilitava a montagem.

No que diz respeito aos testes reais realizados é de notar que a perda de carga, conforme foi previsto pela simulação no *FLUENT*, aumenta com a velocidade dos gases. Na comparação da perda de carga simulada no *FLUENT* e a perda de carga medida no ciclone real expõe-se uma diferença significativa. A perda de carga medida é menor que a simulada conforme pode ser visto na Figura 5.7.

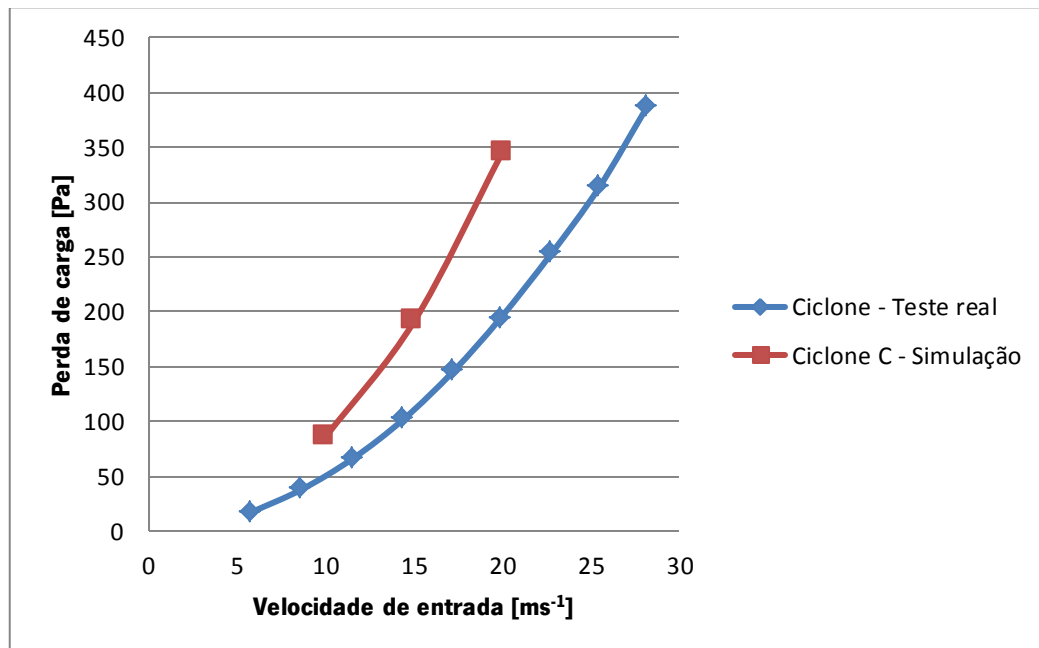


Figura 5.7 Comparação de perda de carga – Teste real e Simulação

Obviamente haveria uma divergência entre a simulação e os testes reais devido a simplificações feitas durante a simulação e nas equações utilizadas mas ainda existe uma explicação com maior peso no entendimento da discrepância dos resultados: a diferença de temperaturas do ar nos testes e na simulação. O ar utilizado nos testes reais tinha a temperatura de ambiente (por volta dos 20°C) e na simulação dinâmica o ar tinha uma temperatura de 150°C e as suas características diferentes vão alterar o comportamento do mesmo. Estas alterações podem ser explicadas recorrendo ao número de Reynolds.

O número de Reynolds, por definição, é uma variável adimensional que descreve o movimento de um fluido relativamente à uma superfície. Em termos físicos apresenta a relação entre as forças de inércias, expressadas pela massa volúmica ρ e a velocidade do fluido U , e as forças de viscosidade, dada pela viscosidade dinâmica do fluido μ e o comprimento característico L da superfície. A partir do número de

Reynolds, e seguidamente a classificação do escoamento em um dos regimes (laminar, transiente ou turbulento), é nos possível fazer análises e comparações entre os dois escoamentos. Uma característica ligada ao número de Reynolds é o factor de fricção. O factor de atrito é um índice sobre o valor da perda de carga, uma vez que, um factor de fricção maior indica a necessidade de uma quantia maior de energia para vencer as forças de arraste o que induz uma perda de carga maior.

O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (6.1)$$

As características do ar à 20°C e à 150°C são:

Tabela 5.2 Características do ar à 20 e 150C

	20°C	150°C
μ [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	1.816*10 ⁻⁵	2.37*10 ⁻⁵
ρ [kg.m ⁻³]	1.205	0.8345

Admitindo a mesma velocidade e o mesmo comprimento característico (o mesmo ciclone para as duas temperaturas) percebemos que o número de Reynolds para uma temperatura de 150°C vai ser menor do que à 20°C. Um número de Reynolds menor indica que as forças de viscosidade são maiores do que com um número de Reynolds maior logo prevemos um factor de atrito maior que se vai traduzir numa perda de carga maior.

Como nota e de forma provar a argumentação anterior, foram realizados mais duas simulações no *Ansys FLUENT* para uma temperatura de 20°C para uma velocidade de entrada de 15 e 20 m.s⁻¹. Os valores de pressões foram mais baixos em relação aos obtidos nas simulações anteriores. A perda de carga calculada encontra-se mais perto do valor adquirido nos testes reais mas ainda têm um valor superior.

6. Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões retiradas do trabalho realizado e sugestões para o trabalho futuro.

6.1 Conclusões

O objectivo desta dissertação era o desenvolvimento de um sistema de remoção de cinzas nas caldeiras a biomassa no ambiente doméstico. Por esta restrição era necessário que o sistema a projetar fosse de tamanho reduzido, para admitir o acoplamento a uma chaminé, e uma certa simplicidade tanto no funcionamento como na manutenção. O baixo custo de fabrico e manutenção bem como a ausência de partes móveis torna os separadores ciclonicos numa opção interessante de estudo para o caso presente.

Assim foram projetados três ciclones de tamanho diferente de forma a poderem ser acoplados a uma chaminé standard. Para cada um destes, foram realizadas simulações com velocidades de ar diferentes (10, 15 e 20 m.s^{-1}) de forma expor as alterações neles próprios e comparado com os outros. As condições de fronteira estabelecidas (viscosidade dinâmica etc.) foram baseadas nas características do ar a 150°C, a temperatura média dos gases de escape de caldeiras a biomassa, e as características, nomeadamente a massa volúmica, das partículas inseridas no escoamento foram baseadas nas cinzas retiradas a uma caldeira a biomassa.

As simulações efectuadas tinham como finalidade definir o perfil de velocidades, o modo como o escoamento se desloca no interior do ciclone, e localizar os pontos com as velocidades máximas e mínimas. Foram ainda determinadas as pressões para cada caso e respectivamente a perda de carga para cada ciclone a qualquer velocidade de entrada estipulada. No que diz respeito a cômputo das reações de partículas no escoamento foi possível retirar informações sobre as probabilidades de separação das partículas dos gases de escape.

Em relação ao perfil de velocidades do escoamento destacou-se que as desacelerações no ciclone ocorrem nas alterações de sentido do movimento dos gases, nomeadamente na secção superior em que o escoamento inicia o movimento rotativo descendente (vórtice exterior) e de mesma forma no fundo do ciclone onde se dá a origem do vórtice interior.

No que diz respeito a perda de carga, os três ciclones não divergem muito entre eles. Um aumento exponencial da perda de carga sucede-se com o aumento da velocidade de entrada sendo o Ciclone C o ciclone com a maior perda. A existência dos dois vórtices, razão pelo elevado nível de turbulências, manifesta-se numa perda de carga elevado comparado com outros equipamentos que não têm partes móveis. Assim temos, por exemplo, para uma velocidade de entrada de 15 m.s^{-1} uma perda de carga por volta dos 150 - 180 Pa.

O movimento de partículas no escoamento depende em grande parte do seu tamanho. Partículas de tamanho maior, tendo uma massa maior, são projetadas contra as paredes do ciclone e caem pela saída inferior e são separadas do escoamento. A probabilidade de captura de partículas de dimensão menor aumenta com o aumento da velocidade do escoamento. Este efeito pronuncia-se ainda mais para partículas de maior tamanho e perde grande parte de efeito para partículas de diâmetro pequeno. Na generalidade destaca-se que a probabilidade de captura das simulações é muito elevada.

Com a realização e comparação dos resultados obtidos, conclui-se que o Ciclone C, o mais pequeno dos três projetados, será o mais adequado para dado ambiente de funcionamento. A perda de carga é pouco superior aos outros dois mas as simulações demonstram uma maior eficiência, particularmente para partículas de diâmetro maior.

As experiências reais efectuadas tinham a finalidade de determinar a perda de carga do Ciclone C, fabricado em aço inoxidável. Desta forma foi possível fazer uma comparação entre os resultados obtidos no *Ansys FLUENT* e num caso real. Como resultado obteve-se uma diferença pronunciada que demonstra que a perda de carga medida no caso real é mais baixo do que nos resultados obtidos na simulação. Uma explicação será a diferença de temperaturas do ar durante os testes. Nos testes reais, a temperatura do ar era a temperatura de ambiente enquanto na simulação o ar tinha uma temperatura de 150°C , portanto tendo uma viscosidade mais baixa explica a menor perda de carga.

6.2 Trabalho futuro

Como trabalho futuro sugere-se a continuação de testes no protótipo desenvolvido. Para obter informações sobre o separador ciclónico real era de grande interesse ligar esse a uma caldeira á biomassa e, por um lado, refazer as medições de perda de carga, e uma medição de concentração de partículas dos

gases de escape na entrada e saída do ciclone de forma determinar a eficiência do mesmo. No que diz respeito a perda de carga prevê-se, devido a maior temperatura do ar, um incremento comparado com os resultados obtidos neste trabalho.

Outro aspecto interessante seria uma análise acerca da hipótese de existir uma alteração em relação a perda de carga e eficiência de captura ao longo do tempo devido a acumulação de partículas nas paredes do ciclone. Partículas acumuladas nas paredes afetam a rugosidade das paredes o que pode causar um aumento da perda de carga mas ao mesmo tempo pode ter um aumento na eficiência como resultado.

Ainda era de interesse um levantamento de custos de fabrico e manutenção para poder estipular um preço para o mercado existente e comparar esse com outros sistemas existentes.

Referências Bibliográficas

- [1] Nathan Russell, Ellen Burkhard, "European Wood-Heating Tecnology Survey: an overview of combustion principles and the energy and emissions performance caracteristics of comercially available systems in austria, germany, denmark, norway, and sweden," New York State Energy Research and development authority, Nova York, 2010.
- [2] Anna Rosentoft Jein, Sandra Hayes, Patrick Bateman, Morten Tony Hansen, English Handbook for Wood Pellet Combustion, EUBIA – European Biomass Industry Association, 2009.
- [3] E. P. Council, Handbook for the Certification of Wood Pellets for Heating Purposes, 2011.
- [4] S. Bram, J De Ruyk, V.K. Verma, "Small scale biomass heating systems: Standard, quality labelling and market driving forces - An EU outlook," *Biomass and Bioenergy, Volume 33, Issue 10*, pp. 1393-1402, 2009.
- [5] Noel de Nevers, Air Pollution Control Engineering, McGraw-Hill Inc., International Editions 1995.
- [6] M. Almeida, Manual de captação de poeiras nos locais de trabalho, Livraria Bertrand, 1980.
- [7] Mohsen Azadi, Ali Mohebbi, Mehdi Azadi, "A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameter," *Journal of Hazardous Materials, Volume 182, Issues 1-3*, pp. 835-841, 2010.
- [8] R. Utikar, N. Darmawan, M. Tade, Q. Li, G. Evans, M. Glenney, Pareek Utikar, "Hydrodynamic Simulation of cyclone separators".
- [9] T.G. Chuah, Fakhru 'I-Razi, Thomas S.Y. Choong, Jolius Gim bun, "The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study," *Chemical Engineering and Processing*, vol. 44, pp. 7-12, 2004.
- [10] Chuen-Jinn Tsai, Kung-Yu Kuo, "On the Theory of Particle Cutoff Diameter and Collection Efficiency of Cyclones," *Aerosol and Air Quality Research, Vol 1*, 2001.
- [11] Leonardo Goldstein Jr., Fábio Luís Fassani, "A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure dorp and collection efficiency," *Powder Technology*, vol. 107, pp. 60-65, 2000.

Anexos

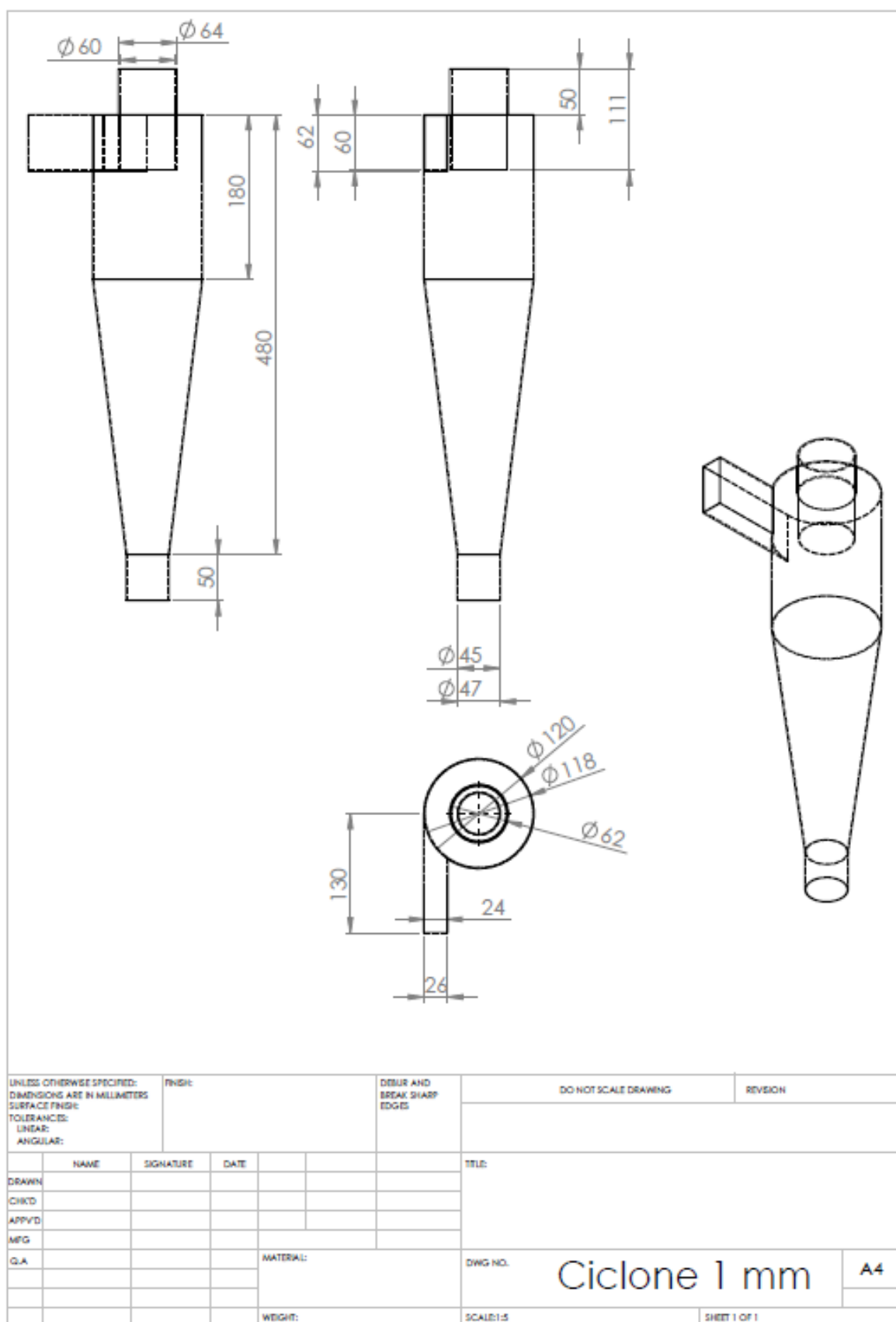
Anexo A – Massa volúmica das partículas – teste experimental

Para uma abordagem exata da deslocação das partículas no *FLUENT* realizou-se um teste de forma determinar a massa volúmica das cinzas, sendo essa uma variável de maior peso. Um determinado volume de cinzas, retirado de uma caldeira a pellets, é pesado, com uma balança de alta precisão como se pode ver na Figura A 1, e introduzindo num tubo de ensaio. Seguidamente é enchido com água até esta ocupar todo o espaço livre entre as partículas das cinzas e medido o volume da água. O volume da água, que entrou no tubo de ensaio, é subtraído do volume das cinzas medido no início. A massa volúmica obtida foi 1519,2 kgm⁻³

3



Figura A.1 Teste experimental - massa volúmica das cinzas



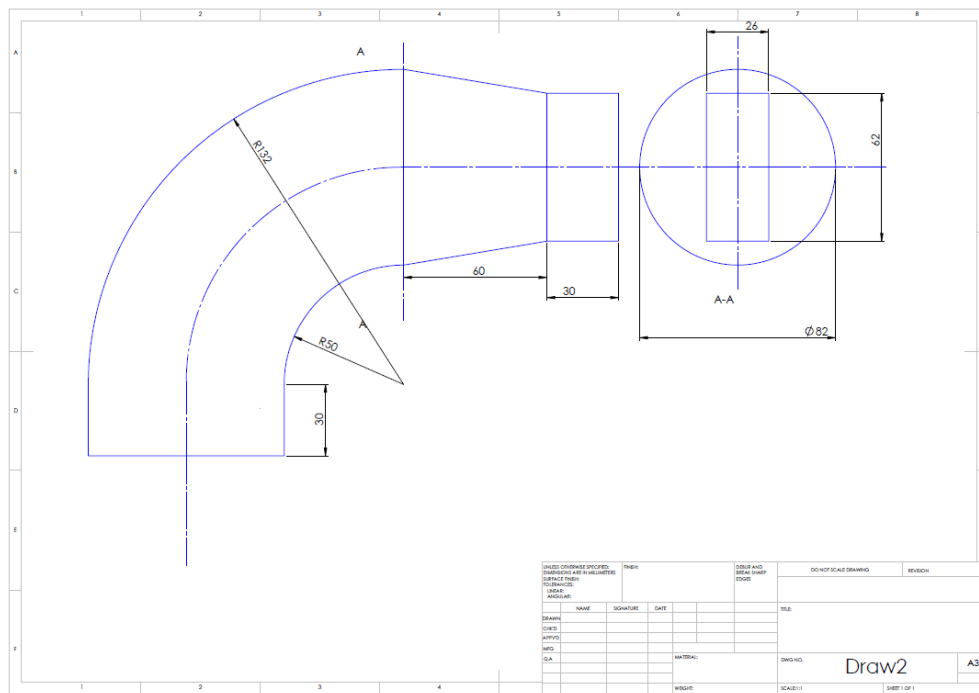


Figura B.2 Transição I para Ciclone C

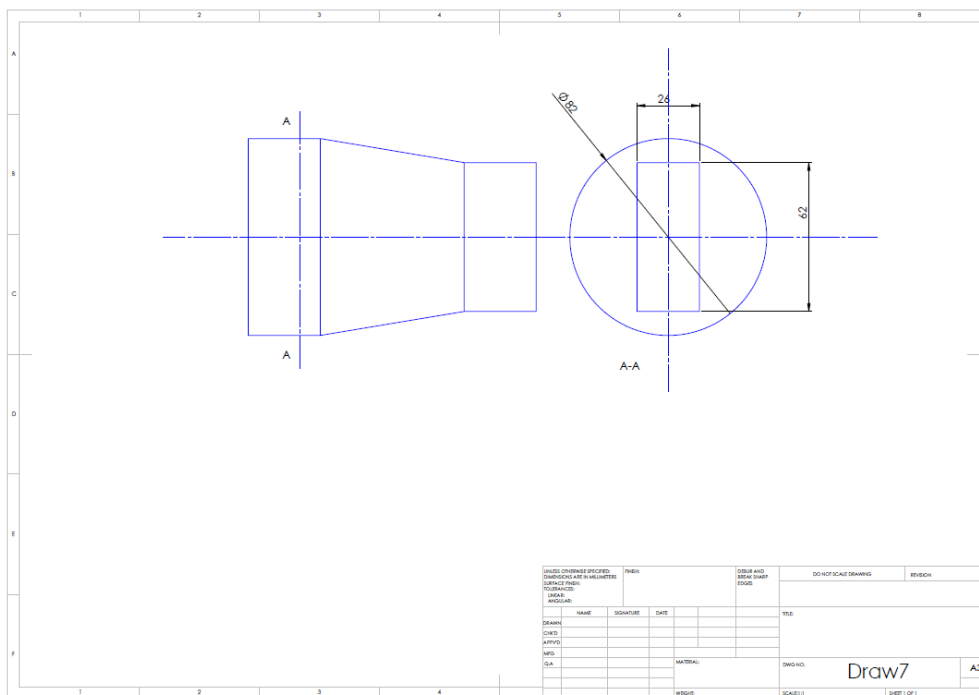


Figura B.3 Transição II para Ciclone C

Anexo C - Resultados *FLUENT*

Magnitude de velocidades

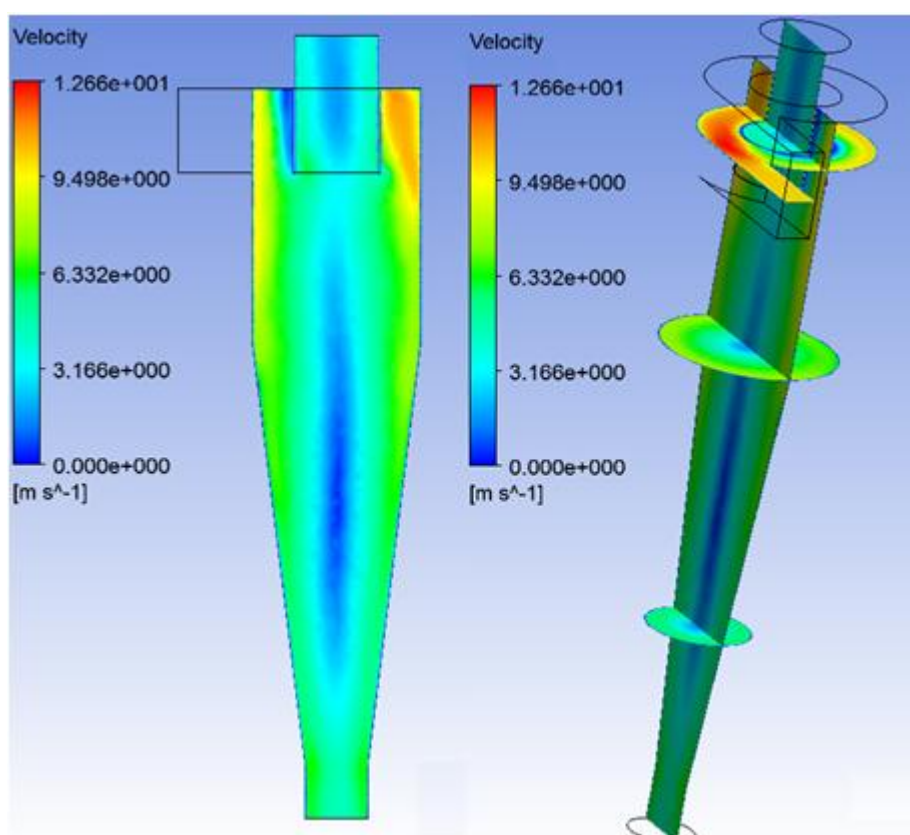


Figura C.1 Ciclone A 10 ms^{-1}

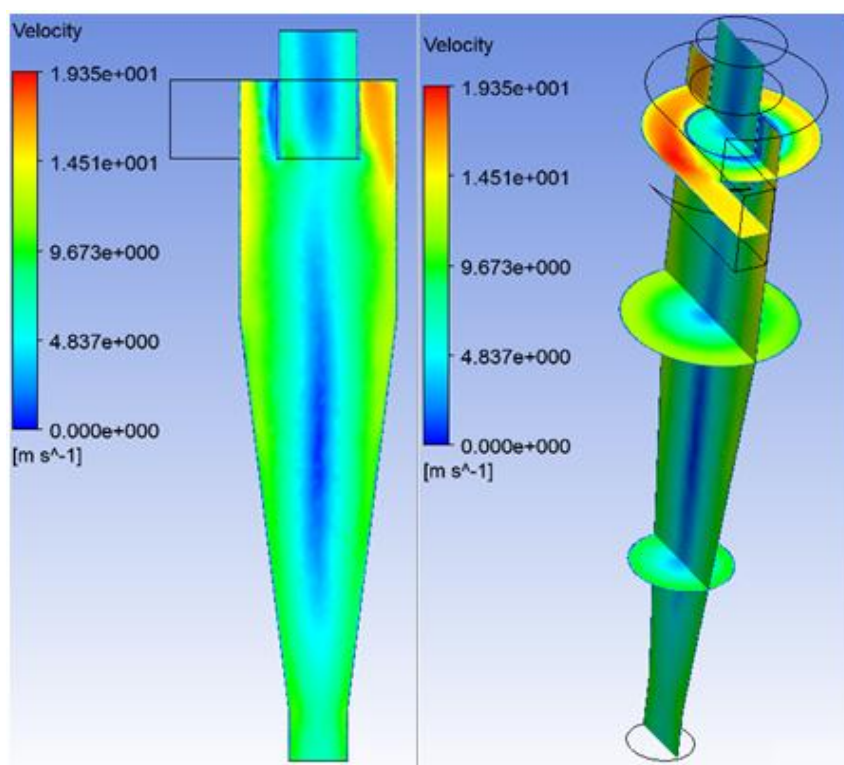


Figura C.2 Ciclone A 15 ms^{-1}

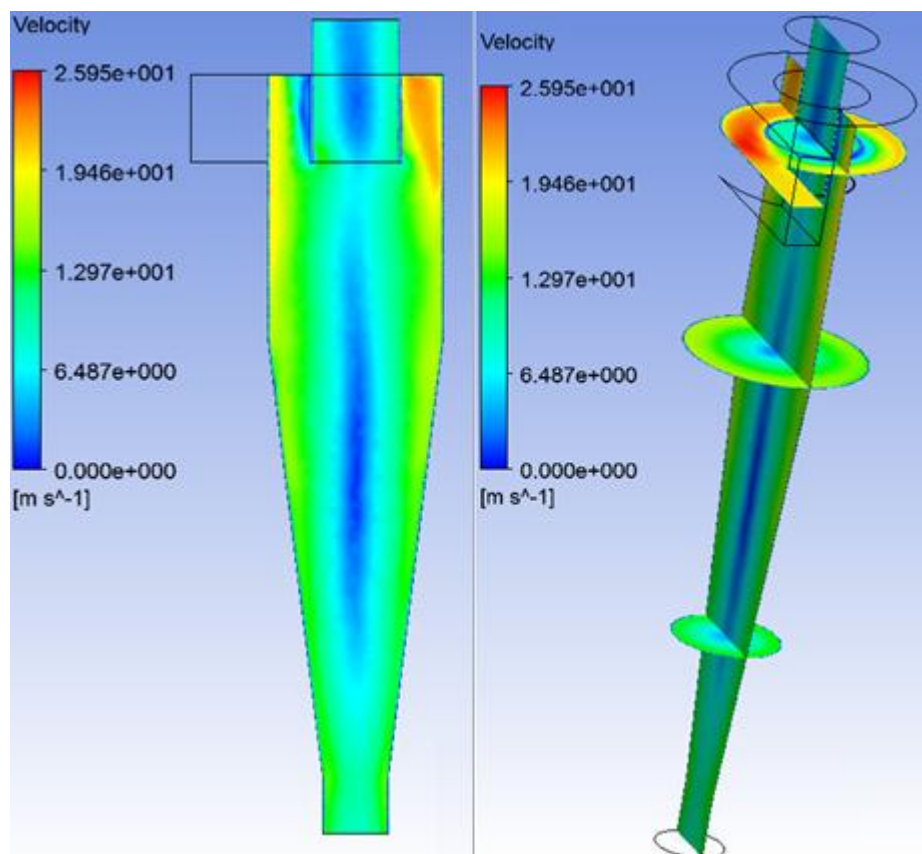


Figura C.3 Ciclone A 20 ms⁻¹

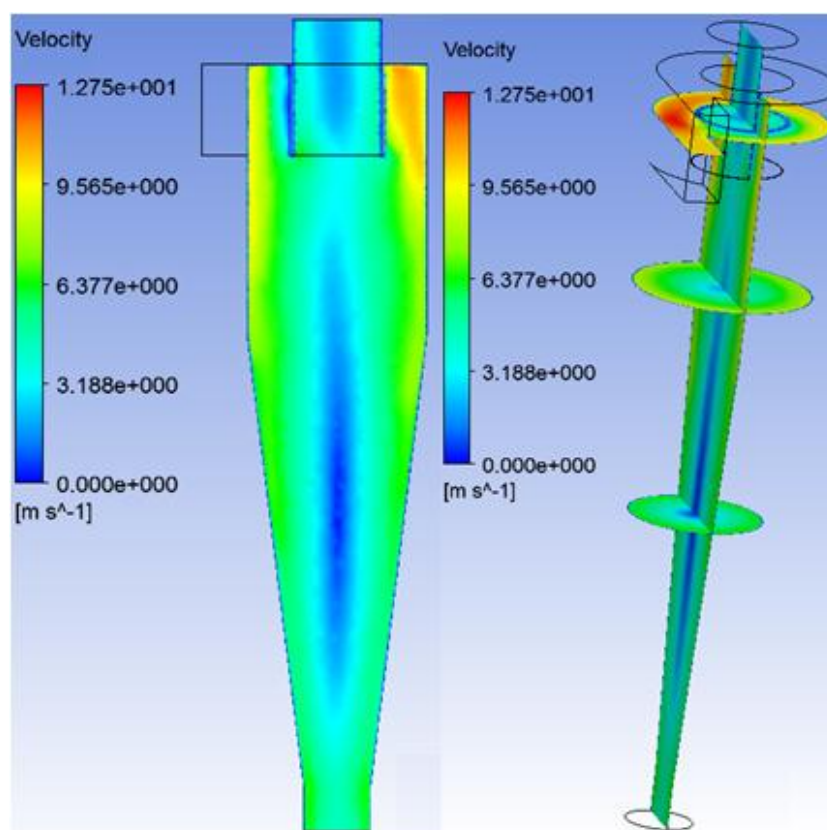


Figura C.4 Ciclone B 10 ms⁻¹

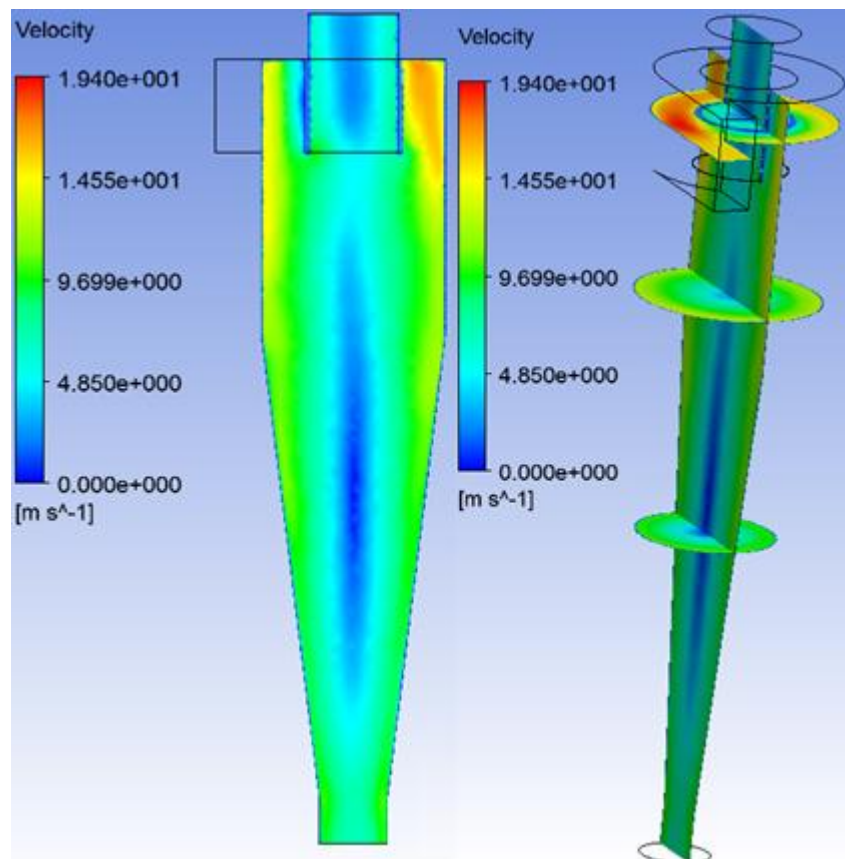


Figura C.5 Ciclone B 15 ms⁻¹

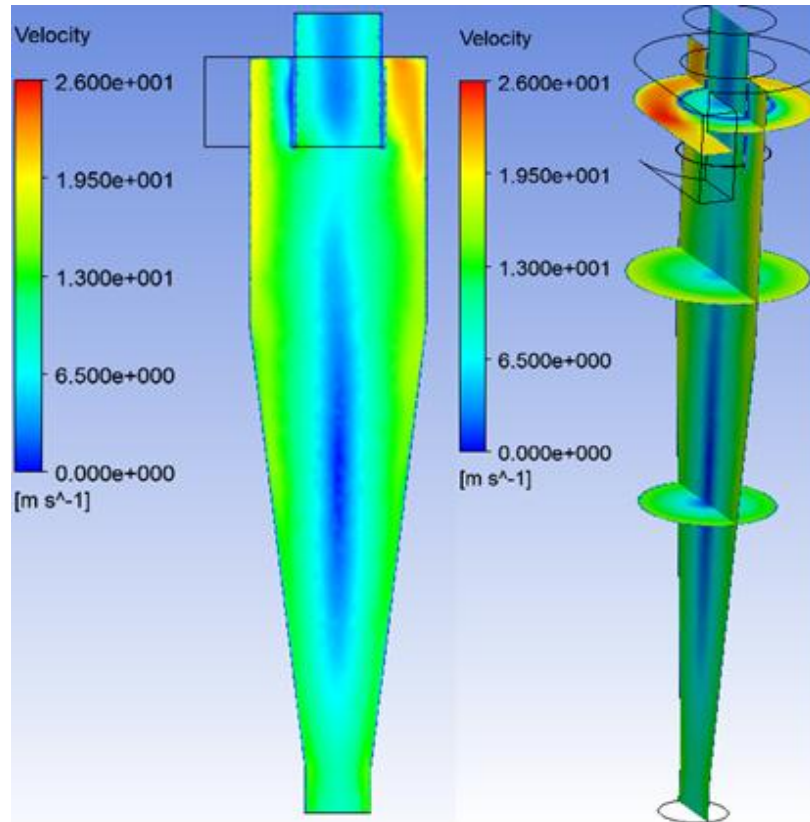


Figura C.6 Ciclone B 20 ms⁻¹

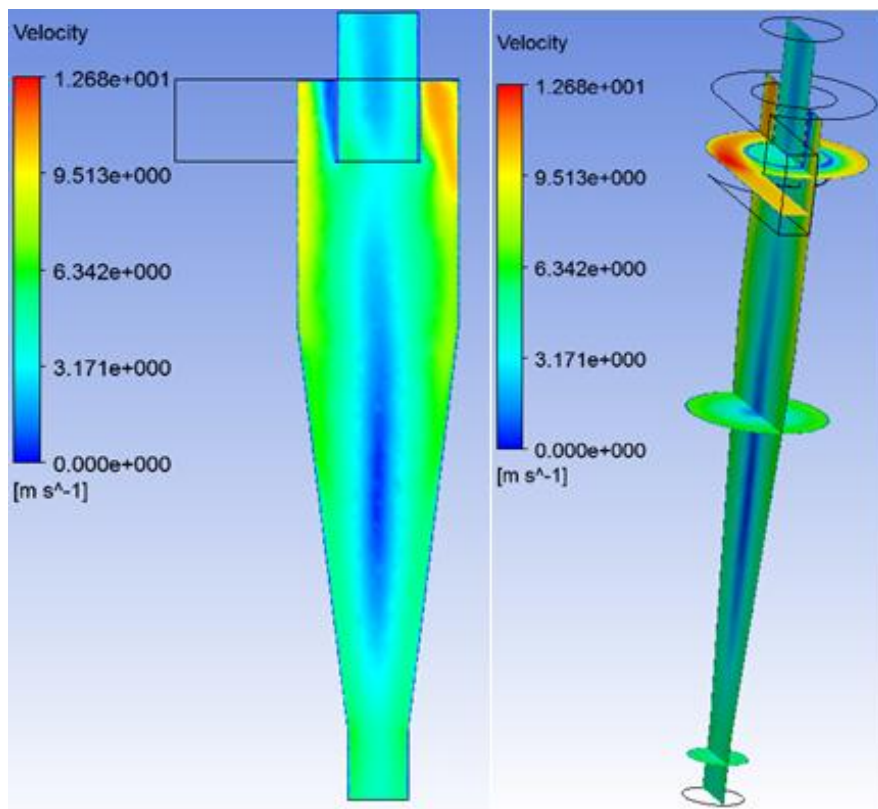


Figura C.7 Ciclone C 10 ms⁻¹

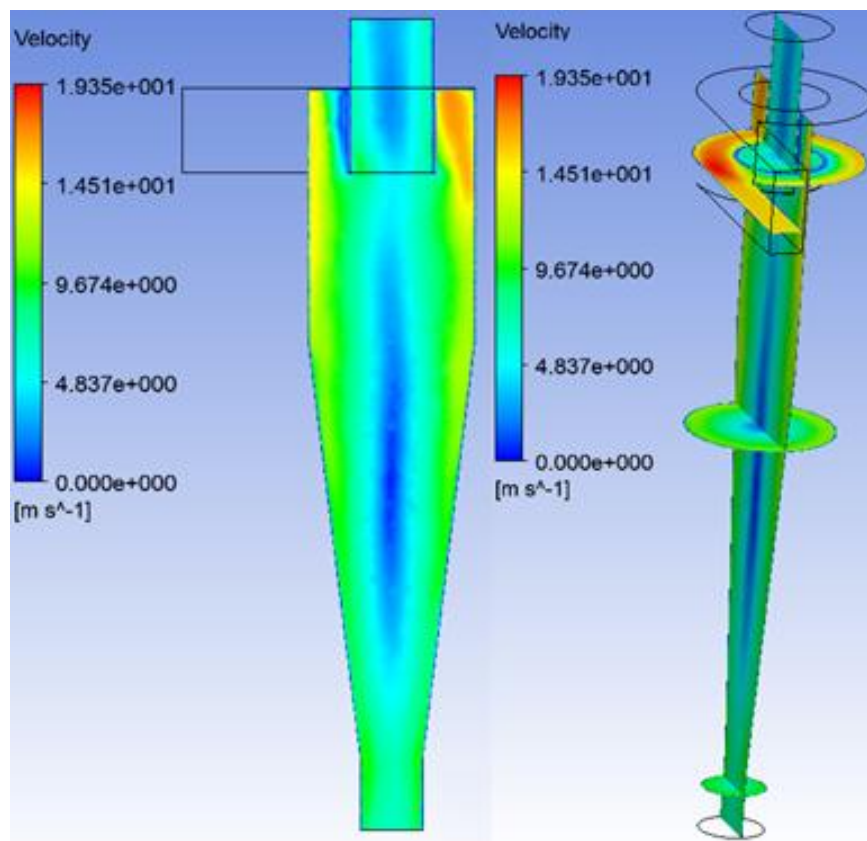


Figura C.8 Ciclone C 15 ms⁻¹

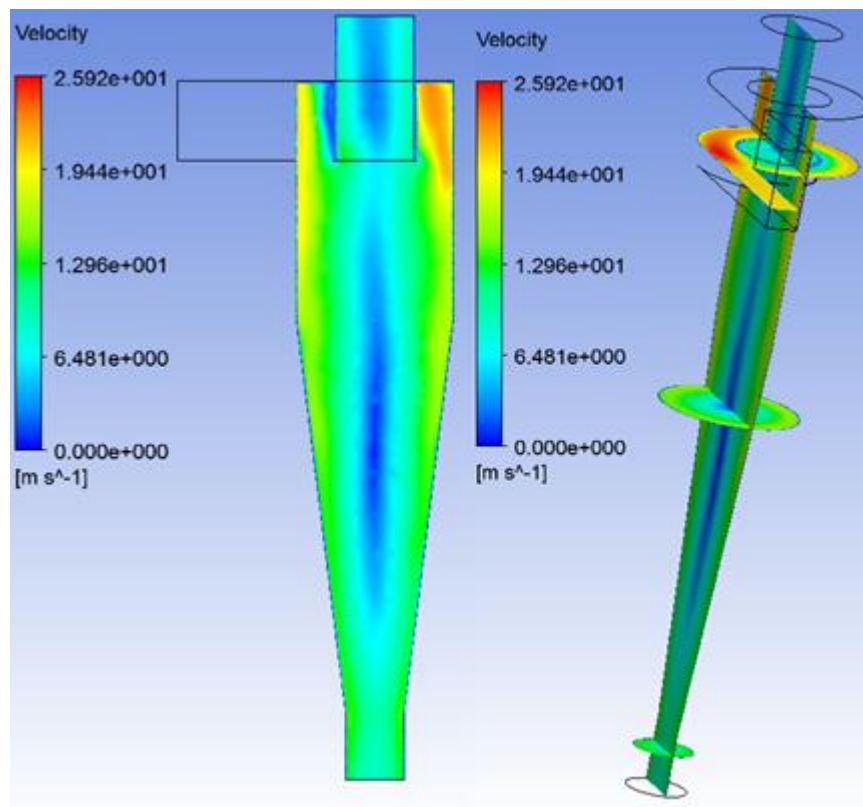


Figura C.9 Ciclone C 20 ms^{-1}

Pressão estática

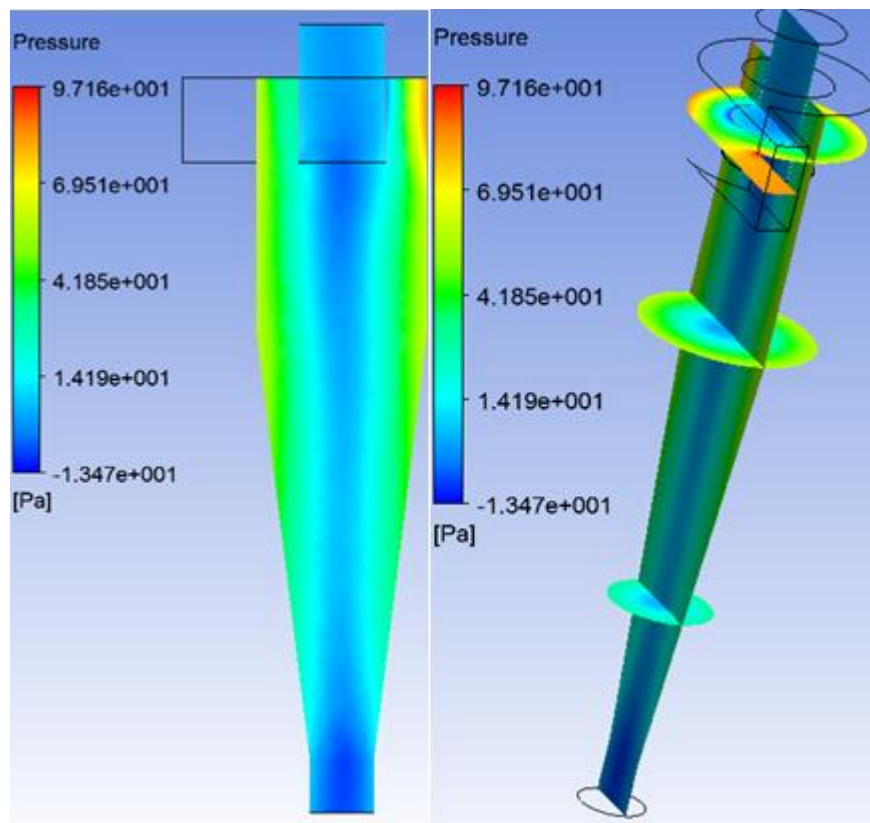


Figura C.10 Ciclone A 10 ms^{-1}

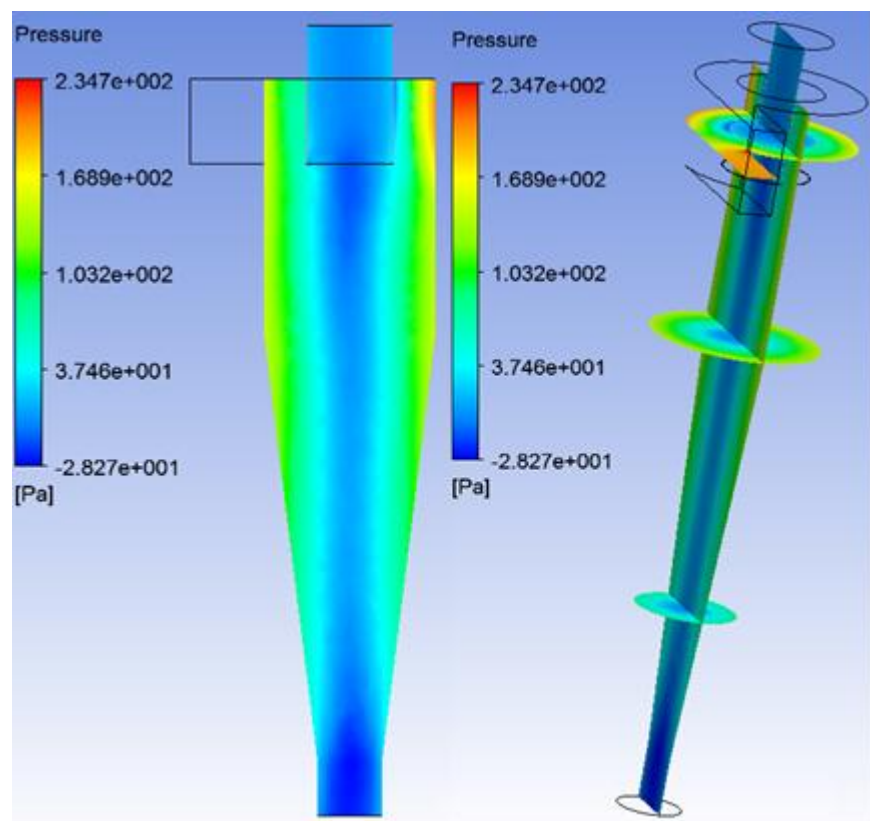


Figura C.11 Ciclone A 15 ms^{-1}

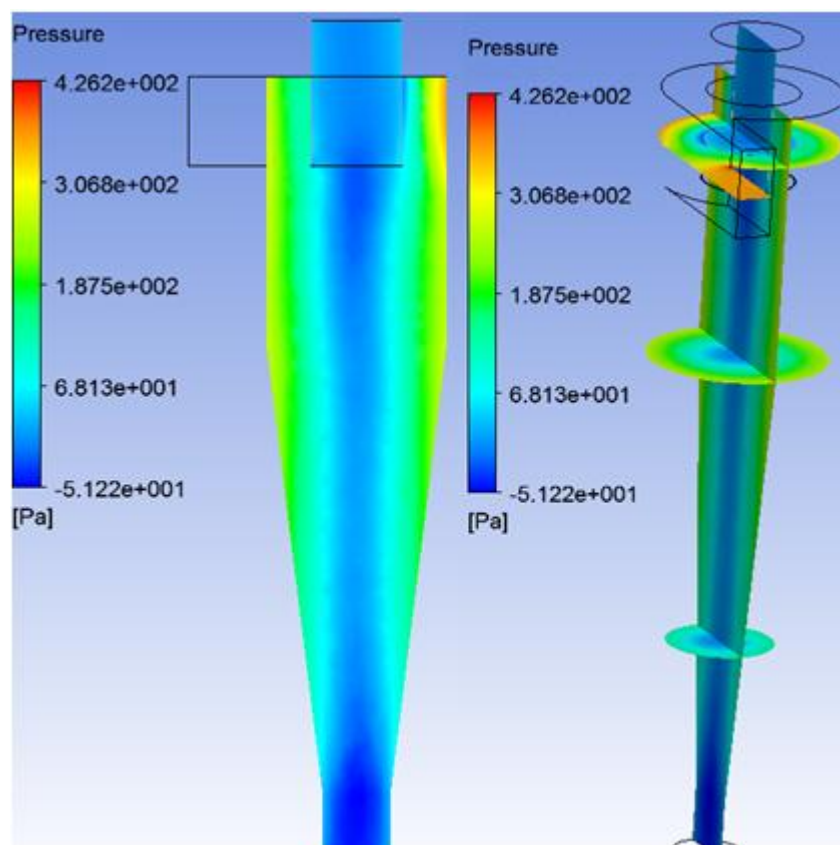


Figura C.12 Ciclone A 20 ms^{-1}

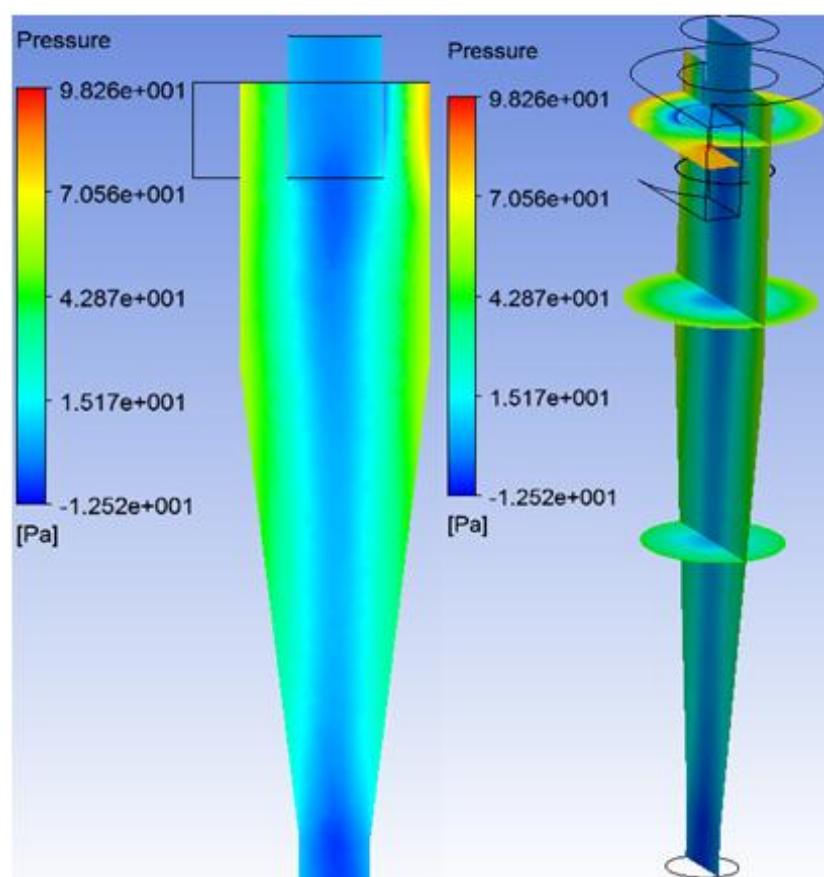


Figura C.13 Ciclone B 10 ms^{-1}

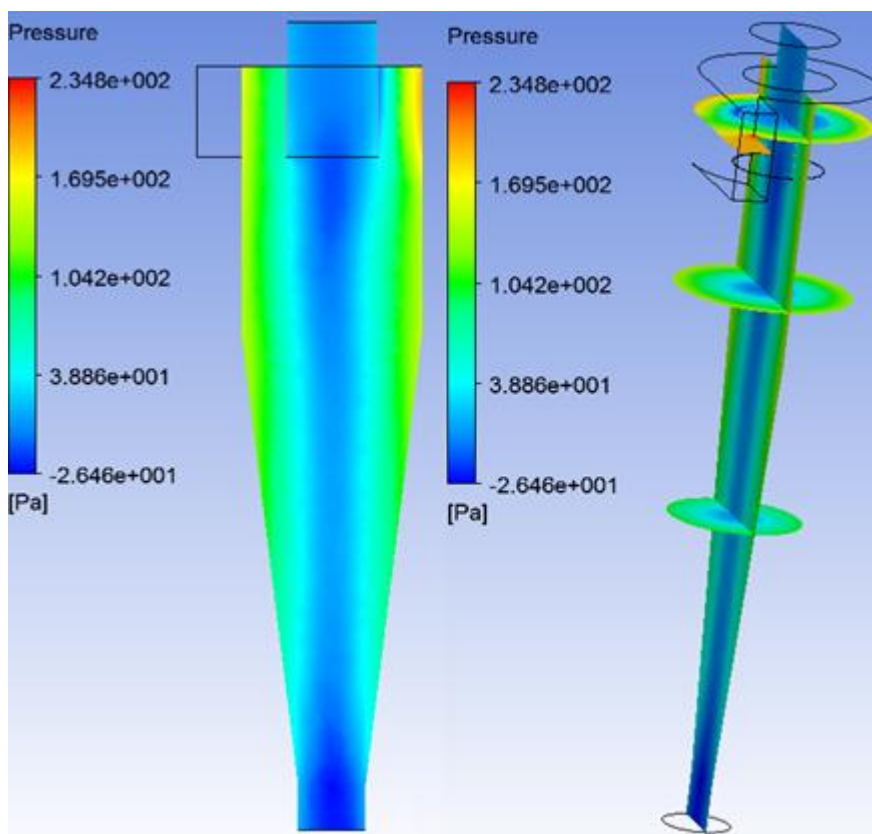


Figura C. 14 Ciclone B 15 ms⁻¹

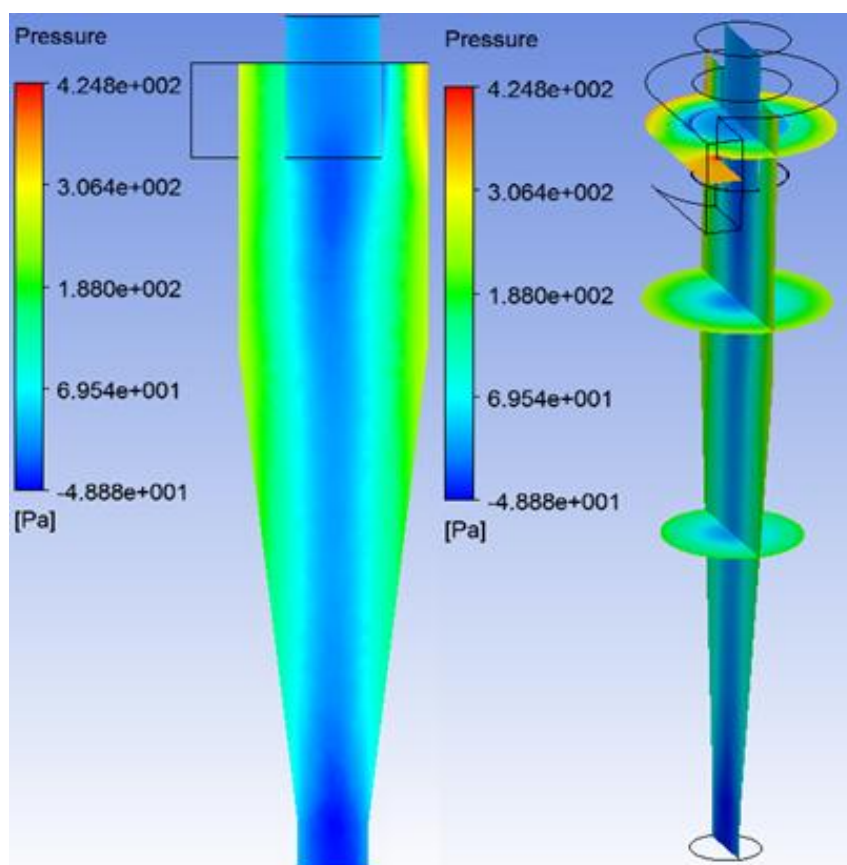


Figura C.15 Ciclone B 20 ms⁻¹

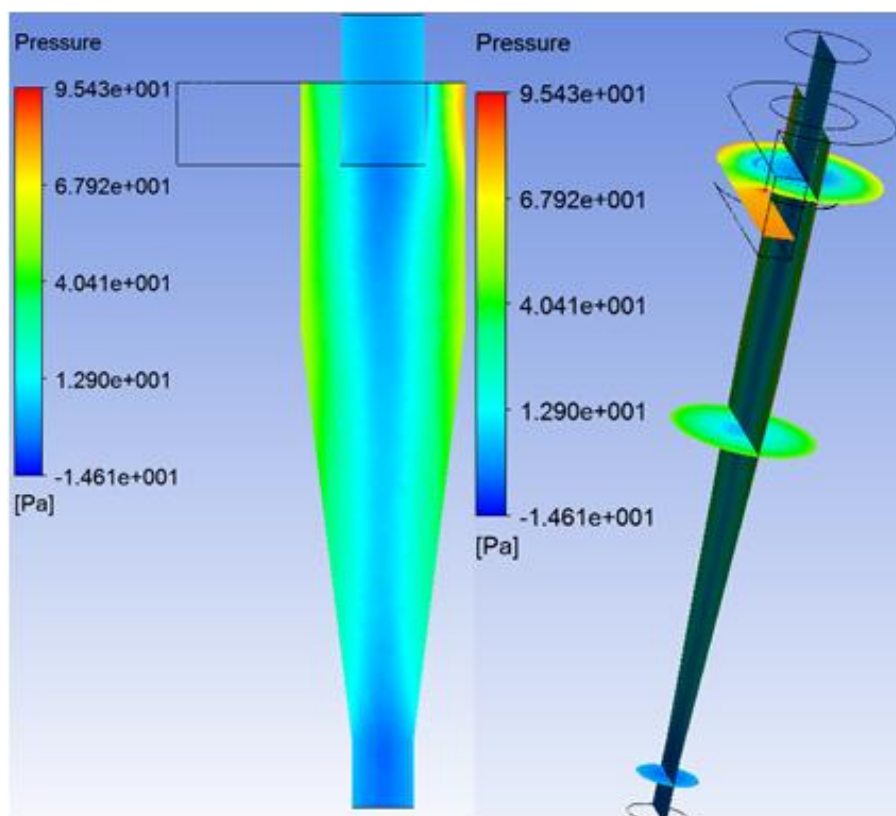


Figura C.16 Ciclone C 10 ms⁻¹

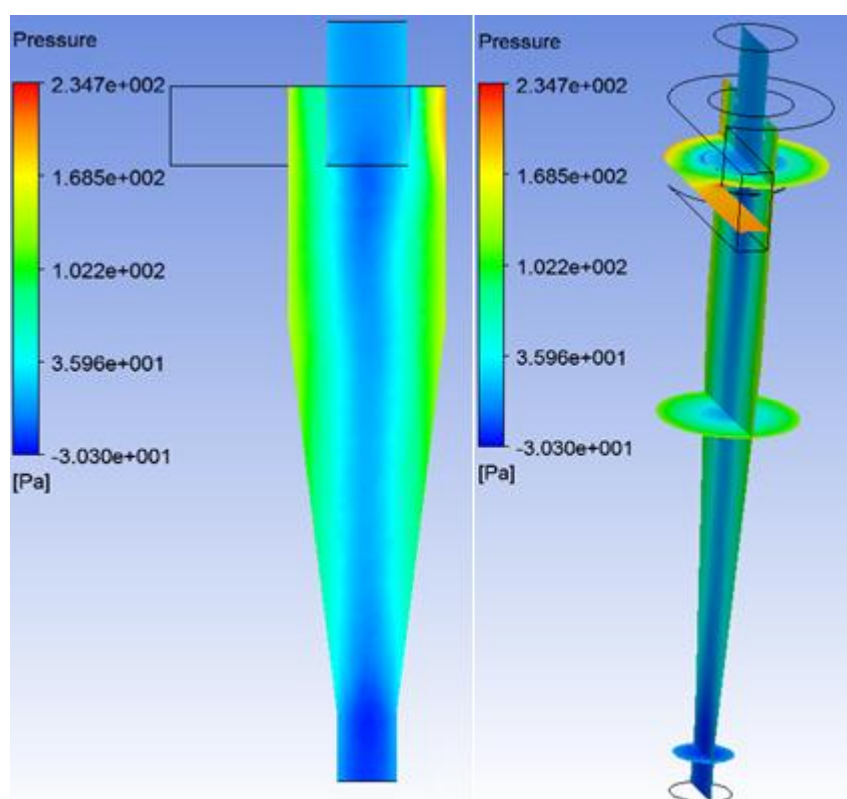


Figura C.17 Ciclone C 15 ms⁻¹

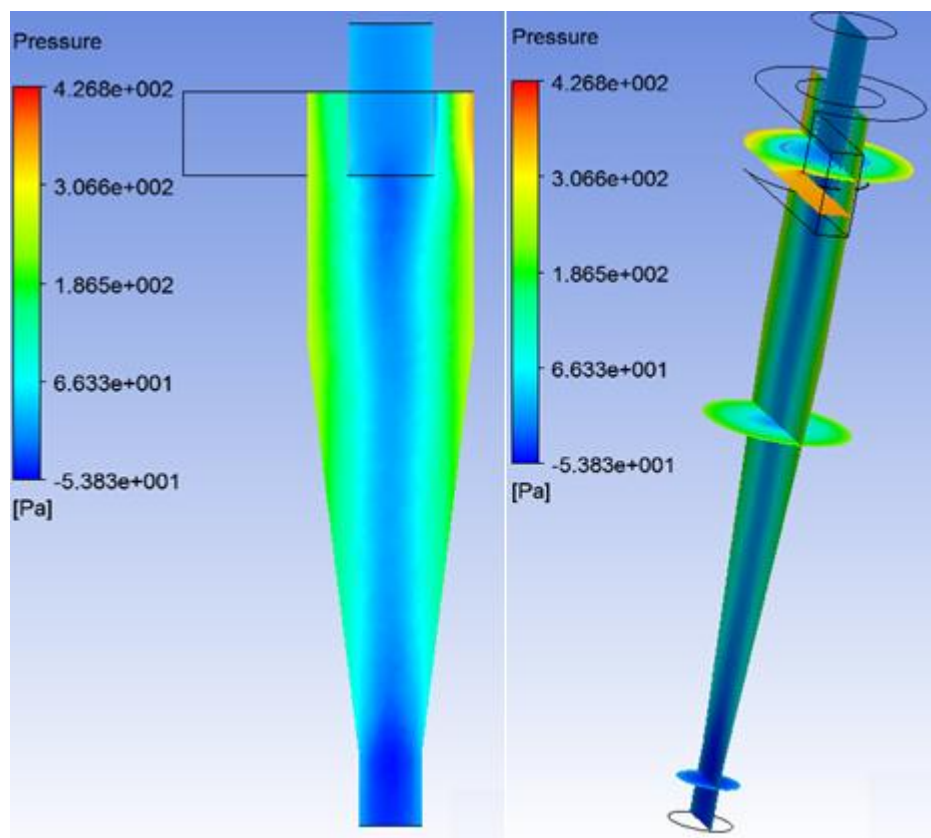


Figura C.18 Ciclone C 20 ms⁻¹

Tabela C.1 Ciclone B (832 partículas por diâmetro)

	10 ms ⁻¹	15 ms ⁻¹	20 ms ⁻¹
1 µm	68.8%	73.1%	75.0%
2 µm	73.1%	79.6%	84.0%
3 µm	78.5%	84.9%	89.0%
4 µm	82.2%	88.4%	96.9%
5 µm	84.9%	96.7%	99.9%
10 µm	99.9%	99.9%	-
15 µm	-	-	-

Tabela C.2 Ciclone C (608 partículas por diâmetro)

	10 ms ⁻¹	15 ms ⁻¹	20 ms ⁻¹
1 µm	69.9%	67.8%	74.5%
2 µm	75.1%	79.7%	84.2%
3 µm	79.2%	85.8%	92.5%
4 µm	83.2%	95.7%	99.8%
5 µm	93.7%	99.9%	99.9%
10 µm	99.9%	-	-
15 µm	-	-	-

Tabela C.3 Ciclone A, B e C á 10 ms⁻¹

	Ciclone I	Ciclone II	Ciclone III
1 µm	74.6%	68.8%	69.9%
2 µm	76.9%	73.1%	75.1%
3 µm	78.5%	78.5%	79.1%
4 µm	83.9%	82.2%	83.2%
5 µm	89.8%	84.9%	93.7%
10 µm	99.9%	99.9%	99.9%
15 µm	-	-	-

Tabela C.4 Ciclone A,B e C á 15 ms⁻¹

	Ciclone I	Ciclone II	Ciclone III
1 µm	76.7%	73.1%	67.7%
2 µm	80.2%	79.6%	79.7%
3 µm	84.9%	84.9%	85.8%
4 µm	93.4%	88.4%	95.7%
5 µm	99.2%	96.7%	99.9%
10 µm	99.9%	99.9%	-
15 µm	-	-	-

Tabela C.5 Ciclone A,B e C á 20 ms⁻¹

	Ciclone I	Ciclone II	Ciclone III
1 µm	79.7%	75.0%	74.5%
2 µm	83.9%	84.0%	84.2%
3 µm	92.2%	89.0%	92.5%
4 µm	99.5%	96.9%	99.8%
5 µm	99.9%	99.9%	99.9%
10 µm	-	-	-
15 µm	-	-	-

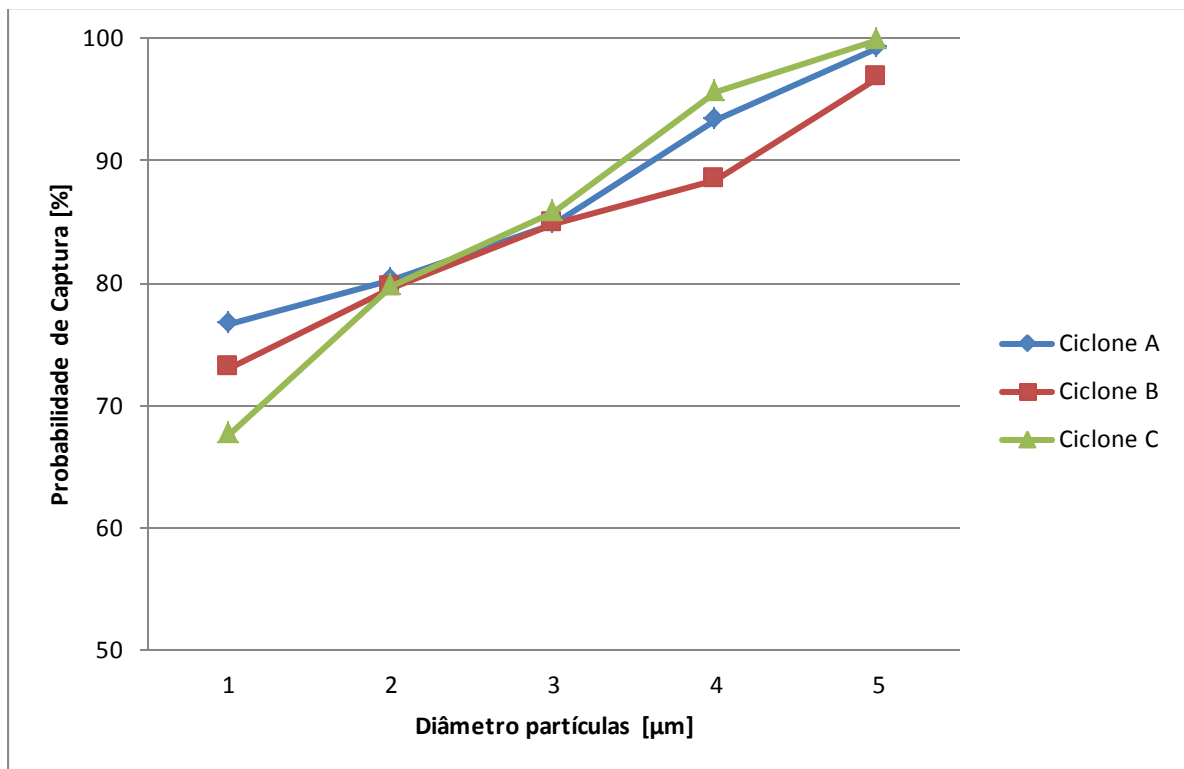


Figura C.19 Ciclone A,B e C á 15 ms⁻¹

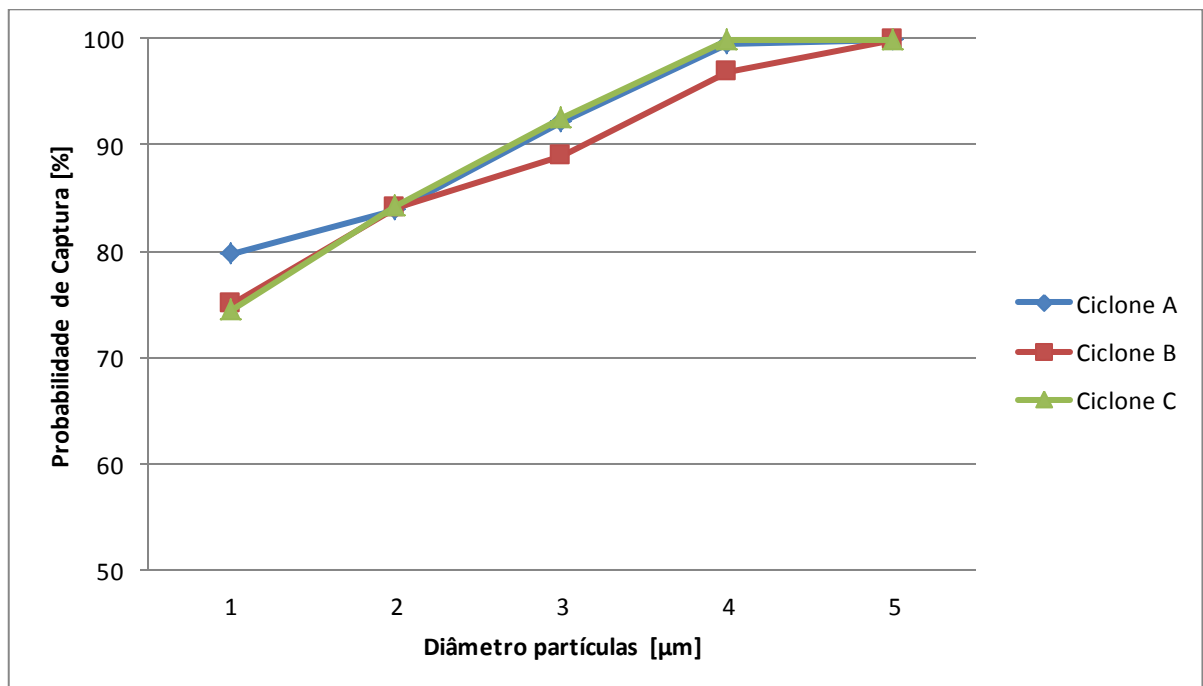


Figura C.20 Ciclone A,B e C á 20 ms⁻¹

Anexo D – Resultados Perda de carga Testes reais

Tabela D.1 Teste perda de carga 23.09.2011

Velocidade de entrada [ms ⁻¹]	Pressão entrada [Pa]	Pressão saída [Pa]	Perda de carga [Pa]
5,763904	20	3	17
8,645856	45	7	38
11,52781	80	14	66
14,40976	125	23	102
17,24361	179	33	146
19,88338	238	44	194
22,7656	312	59	253
25,45271	390	77	313
28,14887	477	91	386

Tabela D.2 Teste de perda de carga 26.09.2011

Velocidade de entrada [ms ⁻¹]	Pressão entrada [Pa]	Pressão saída [Pa]	Perda de carga [Pa]
5,763904	20	3	17
8,645856	45	7	38
11,52781	80	14	66
14,46728	126	22	104
17,29171	180	33	147
20,0083	241	45	196
22,83845	314	63	251
25,48532	391	74	317
28,06021	474	89	385

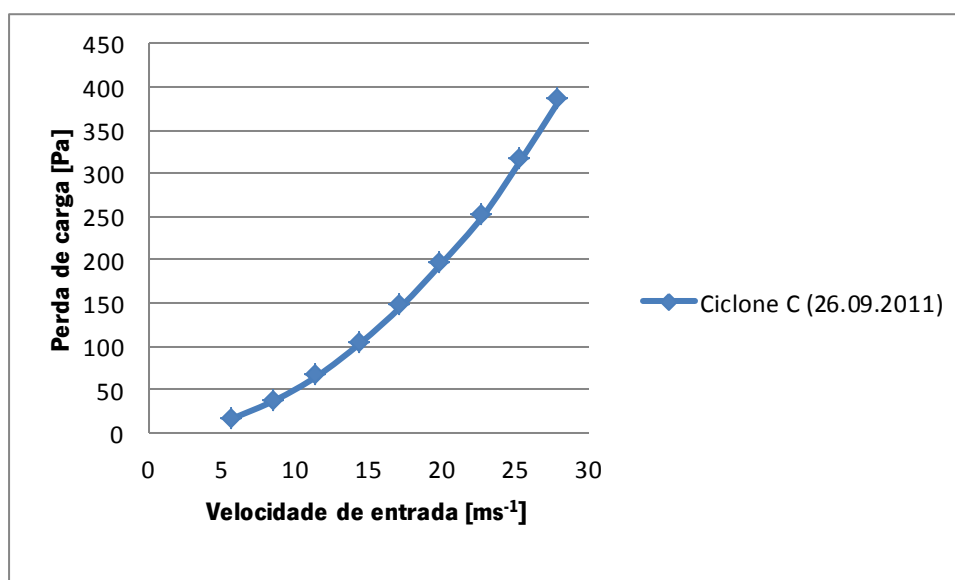


Figura D.1 Perda de carga 26.09.2011

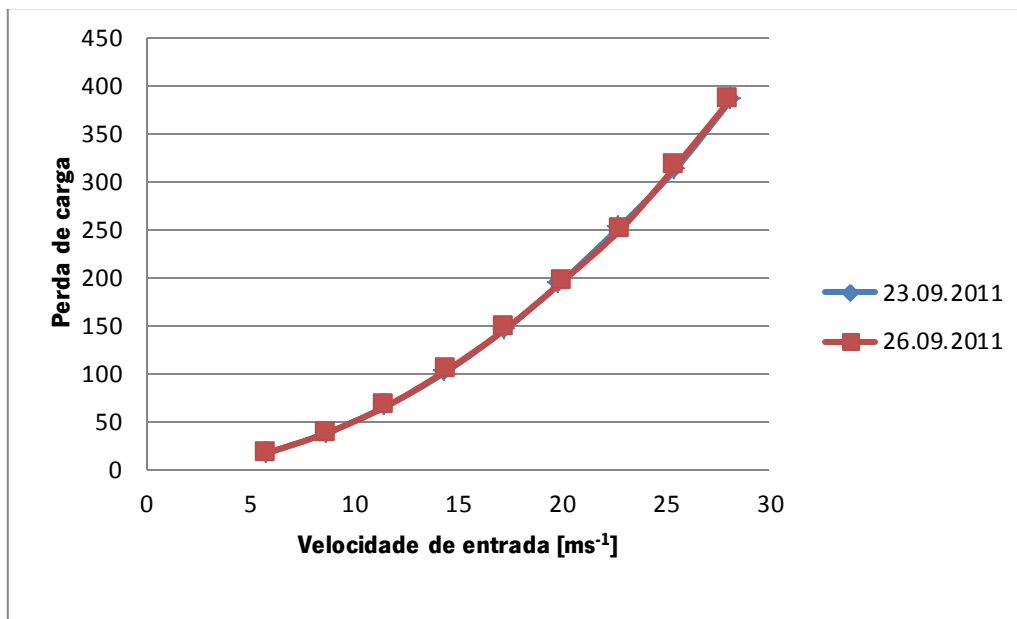


Figura D.2 Perda de carga dos dois testes realizados

PROJECTO E SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE SEPARAÇÃO DE CINZAS PARA CALDEIRAS A BIOMASSA

Cristoffer Fernandes¹, José Carlos Fernandes Teixeira², Manuel Eduardo Cardoso Ferreira²

1-Universidade do Minho,Campus de Azurém, Guimarães, Portugal, email: a50156@alunos.uminho.pt

2- Universidade do Minho,Campus de Azurém, Guimarães, Portugal, email: {j,tef}@dem.uminho.pt

Palavras chave: Biomassa, Cinzas, Cidones

Resumo

No final do século XX surgiu uma nova consciencialização sobre a utilização de recursos energéticos fósseis, devido ao seu carácter finito e pelos problemas ambientais daí resultantes. Neste contexto, a EU estabeleceu para 2020 a meta de utilização de 20% de energia renovável e a redução das emissões de gases de estufa em 20%. O peso do sector residencial e de edifícios representa cerca de 40% do consumo de energia primária na Europa pelo que tem sido objectivo de directivas no sentido de incrementar a eficiência de utilização energética e, em simultâneo, diversificar as fontes de energia primária.

Neste contexto, a biomassa representa uma alternativa de elevado potencial sendo um recurso renovável e endógeno. O recente desenvolvimento de tecnologias para o uso eficiente na geração de electricidade e calor torna a biomassa uma alternativa atraente. De entre estas, as aplicações directas em calor apresentam-se particularmente atractivas, sendo economicamente competitivas em comparação com os combustíveis fósseis. Em termos de impacto ambiental é importante referir que as emissões de CO₂, não causam um incremento do efeito de estufa uma vez que o CO₂ libertado corresponde ao absorvido pela própria planta durante o seu ciclo de vida. A combustão de biomassa apresenta como principal inconveniente a libertação de cinzas, problema que é particularmente importante em instalações domésticas. A emissão de cinzas depende do seu teor no combustível e da não retenção no interior da câmara de combustão. A sua redução passa pois pela actuação ao nível do combustível, da câmara de combustão ou em acções a jusante desta. Neste contexto, a introdução de sistemas de limpeza a jusante aparece com elevado potencial, em particular para equipamentos já existentes. A existência de um sistema de limpeza permite a utilização de biomassa de menor qualidade (menor custo e maior teor de cinzas), para além de permitir o cumprimento dos limites legais das emissões gasosas. Deste modo, faz sentido o desenvolvimento de sistemas eficazes de limpeza de cinzas, a jusante da câmara de combustão. Os separadores ciclónicos encontram-se entre os mais promissores pela sua simplicidade de funcionamento e baixo custo. A maior dificuldade encontra-se ao nível do espaço que ocupam e da necessidade de elevadas acelerações que por sua vez causam grandes perdas de carga.

O presente projecto aponta para o desenvolvimento e ensaio de um sistema de limpeza por via seca a ser adaptado a uma chaminé standard numa caldeira doméstica. Recorrendo a ferramentas de computação em dinâmica de fluidos (*ANSYS FLUENT*) o objectivo deste trabalho é encontrar uma solução apropriada em termos de atravancamento e teor de cinzas removidos, recorrendo a um ou múltiplos ciclones em paralelo. Os resultados computacionais serão futuramente complementados com a realização de ensaios experimentais em protótipo.

1. Introdução

Cidones são equipamentos muito eficazes para a separação de partículas de um fluido. Eles destacam-se pela simplicidade de construção, uma vez que não há peças que se movimentam: baixo custo, tanto na construção como na manutenção, e uma perda de carga aceitável, comparando com outros equipamentos, baixa. A maioria das suas aplicações encontra-se a nível industrial mas pretende-se com este estudo conseguir uma aplicação ao sector doméstico de forma a reduzir a emissão de partículas libertadas durante a queima numa caldeira a pellets. Apesar da sua aparente simplicidade o estudo do comportamento no interior é complexo e de análise difícil. A eficiência de um cidone está sujeita a grandes variações como alterações na sua geometria e as condições de operação. Pode-se dizer que quanto maior for o cidone maior será a perda de carga associada e menor será a eficiência de captação de partículas. Relativamente à velocidade de entrada sabe-se que o número de partículas recolhidas aumenta com a velocidade [1,2]. Isso explica-se pelo escoamento ocorrido no interior do cidone. O fluxo no interior caracteriza-se por dois grandes vórtices, um exterior descendente e um, interior, ascendente. A complexidade do escoamento torna difícil o processo de optimização da forma do cidone. A existência de ferramentas empíricas permite ter uma aproximação que é muitas vezes aceitável para o dimensionamento de equipamentos mas que se torna inadequada para o projecto de soluções não convencionais. Neste contexto o recurso à computação em dinâmica de fluidos (vulgarmente designadas por CFD) permite a realização de vários ensaios em tempo reduzido e a um custo aceitável pelo que pode ser uma importante ferramenta na optimização da forma do cidone.

O presente trabalho reporta o estudo computacional de 3 diferentes cidones, optimizando a malha, tendo em consideração a qualidade dos resultados a obter e o tempo de cálculo computacional utilizando o software *Ansys FLUENT*.

2. Geometria

Os cidones do tipo Stairmand são os mais simples e mais utilizados na indústria. Esses têm uma definição dada em termos de dimensões dos diferentes componentes normalmente referenciados ao diâmetro exterior D do cidone. As dimensões relativas dos cidones tipo Stairmand de alta eficiência são: $a=S=De=0.5D$, $b=0.2D$, $h=1.5D$, $H=4D$ e $B=0.375D$ [3]. Na figura 1 encontram-se as principais características geométricas de um cidone Stairmand que serviram de base aos casos estudados.

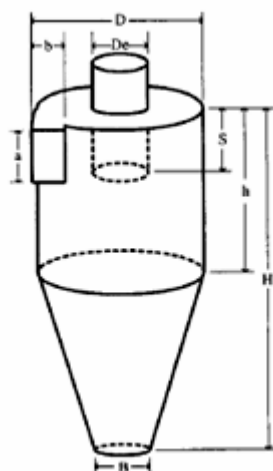


Figura 1: Ciclone tipo Stairmand [3]

Atendendo a que o cidone a estudar será construído para o uso no sector doméstico, existem diversas limitações que têm de ser consideradas. Nomeadamente, o diâmetro da chaminé standard encontra-se entre os 80-90mm e é por essa razão que o diâmetro do orifício de saída superior (De) não pode exceder este valor.

Foram desenhados três ciclones: o Ciclone I cujo diâmetro de saída é coincidente com o da chaminé standard (80mm), o Ciclone II cujo diâmetro exterior é superior ao Ciclone I e o Ciclone III cujo diâmetro do orifício superior. As medidas dos três ciclones encontram-se sumariadas na tabela 1:

Tabela 1: Dimensões geométricas dos 3 ciclones

Dimensões (mm)	Ciclone I	Ciclone II	Ciclone III
D	160	200	120
De	80	100	60
a	80	100	60
b	32	40	24
S	80	100	60
H	640	800	480
h	240.2	300	180
B	60	75	45

3. Modelação matemática

Como já referido anteriormente, o escoamento no interior do ciclone é muito complexo e de estudo dificultado. As inúmeras complicações práticas na simulação numérica explicam-se pelo facto do fluxo ser de uma anisotropia elevada.

Para um escoamento constante a equação de Navier-Stokes pode ser determinado como [1]:

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

onde u , P , ρ e μ representam a velocidade do fluido, a pressão, densidade e viscosidade respectivamente e

$$\tau_{ij} = - \overline{\rho u'_i u'_j}$$

descreve o efeito das turbulências flutuantes no escoamento.

3.1 Modelo de turbulência

O *Ansys FLUENT* disponibiliza uma grande gama de modelos de turbulência. A escolha e utilização do modelo mais adequado é de maior importância na fase de simulação, uma vez que grande parte de erros ou divergências, de simulação para realidade, podem surgir de uma má seleção.

No âmbito do *FLUENT* existem três tipos de modelos que são aplicáveis para escoamentos em regime turbulento:

- o modelo Standard $k - \epsilon$,
- o modelo de grupo de renormalização (RNG) $k - \epsilon$
- e o Reynolds Stress Model (RSM)

Os primeiros dois modelos destacam-se pela sua simplicidade e tempo de cálculo económico. Estes usam duas equações para determinar a energia cinética turbulenta k e taxa de dissipação ϵ . Na maior parte dos escoamentos turbulentos a aplicação de um destes dois modelos serve para adquirir dados úteis, mas no caso presente o Reynolds Stress Model será o mais adequado.

O RSM (Reynolds Stress Model) é o modelo mais elaborado que o *FLUENT* permite utilizar. Nas aplicações em 2D, terão de ser calculadas 5 equações e em 3D são 7 equações adicionais. O RSM abrange os efeitos de curvatura, rotação e mudanças bruscas no escoamento de uma forma mais precisa que um dos modelos referidos anteriormente. Logo, é um modelo adequado quando se trata de um escoamento mais complexo como por exemplo uma passagem de fluxo rotativa [1]. Porém é importante de ter em conta um maior tempo de cálculo computacional que, dependendo do caso, não justifica a sua aplicação. No caso presente será o modelo mais adequado, uma vez que o escoamento no interior do dóne é turbulento e sofre grandes alterações devido a geometria do próprio dóne, que vai induzir dois movimentos, um helicoidal descendente e helicoidal ascendente no sentido invertido. Sendo o mais complexo e completo dos modelos existentes também é o mais exaustivo em termos de tempo de cálculo.

3.2 Malha

Para garantir uma boa qualidade dos resultados e que estes sejam representativos das condições estudadas é importante ter uma malha bem definida e fina. Esta afirmação torna-se ainda mais legítima quando nos recordamos que o escoamento a ser estudado é turbulento. É por isso que foram realizadas diversas refinações da malha, nomeadamente em redor de todo o corpo do dóne, ou seja, em todas as zonas que representam as paredes do dóne. Portanto, a partir das paredes do dóne para o interior existe um incremento no tamanho das células por um factor de 1.1 até ao tamanho máximo de 1cm^2 . Esta medida é justificada com a importância da evolução do escoamento a partir da parede do dóne e o cálculo matemático exigente. Outro aspecto é o cálculo do movimento das partículas no fluido e a suas interações com a parede.

Uma outra refinação efectuada na malha encontra-se na entrada do ciclone. Assim é assegurado que o cálculo em relação ao desenvolvimento do perfil de velocidade no início seja o mais realista possível. Os ciclones I,II e III têm malhas de 1 725 862, 1 681 475, 1 561 951 elementos respectivamente.

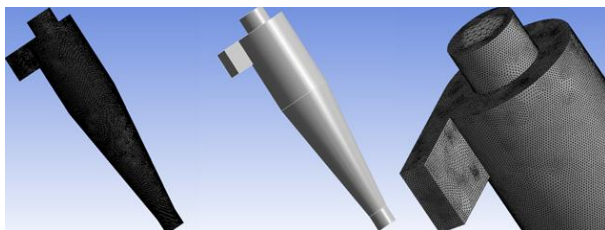


Figura 2: Ciclone I com e sem malha

3.3 Massa volúmica das partículas (cinzas)

Para uma abordagem exacta da deslocação das partículas no *FLUENT* realizou-se um teste de forma determinar a massa volúmica das cinzas, sendo essa a variável de maior peso. Um determinado volume de cinzas, retirado de uma caldeira a pellets, é pesado, com uma balança de alta precisão como se pode ver na figura 3, e introduzindo num tubo de ensaio. Seguidamente é enchido com água até esta ocupar todo o espaço livre entre as partículas das cinzas e medido o volume da água. O volume da água, que entrou no tubo de ensaio, é subtraído do volume das cinzas medido no início. A massa volúmica obtida foi 1519,2 kg m⁻³.



Figura 3: tubo de ensaio com cinzas e balança de precisão

3.4 Condições de fronteira

As variáveis inseridas no *FLUENT* servem para aproximar a simulação ao escoamento real no ciclone. Os gases de escape da caldeira a pellets no caso real situam-se entre os 100° e 200°C por isso admite-se que a temperatura do ar na entrada do ciclone é de 150°C. Logo a viscosidade dinâmica do ar vai ter o valor de 2.3×10^{-5} kg/ms.

Cada simulação induz o cálculo do movimento de 8 partículas de diâmetro diferentes (1, 5, 10, 100, 500, 1000, 1500, 750 μ m) para compreender que partículas vão escapar pela parte superior do ciclone, significando que não conseguem ser separadas dos gases de escape, e quais conseguem ser capturadas.

Foram realizadas nove simulações, três para cada ciclone. Os dados referidos anteriormente são iguais em cada uma delas e considerados constantes durante o cálculo. Para cada ciclone foram realizadas simulações com velocidades de entrada de 10, 15 e 20 m/s.

Para a simulação foi utilizado um computador com um processador de 2.66 GHz com 4 GB de RAM.

4. Resultados e discussão

Depois de ter realizado todas as simulações é feita uma análise dos resultados obtidos nomeadamente do perfil do escoamento, com os picos de velocidade, a variação da pressão no ciclone como também a perda de carga em geral e o movimento das partículas dentro do ciclone.

4.1 Perfil do escoamento e velocidade

Como já referido anteriormente o escoamento no interior de um ciclone é bastante complexo e com variações em termos de velocidade e direção do fluido à movimentar-se. Como pode ser observado na figura 4 a magnitude da velocidade aumenta da divisão inferior até a parte superior. Assim ocorre uma aceleração na entrada do ciclone, nesta zona o vector da velocidade é aproximadamente horizontal. A velocidade máxima atingida é de 130% do valor inicial. Observe-se seguidamente que durante o movimento descendente perto das paredes do ciclone a velocidade diminui continuamente até chegar ao ponto mais baixo do equipamento. A partir do momento em que o escoamento inicia o movimento ascendente, em qualquer um dos casos, a velocidade encontra-se por baixo dos 10 m/s.

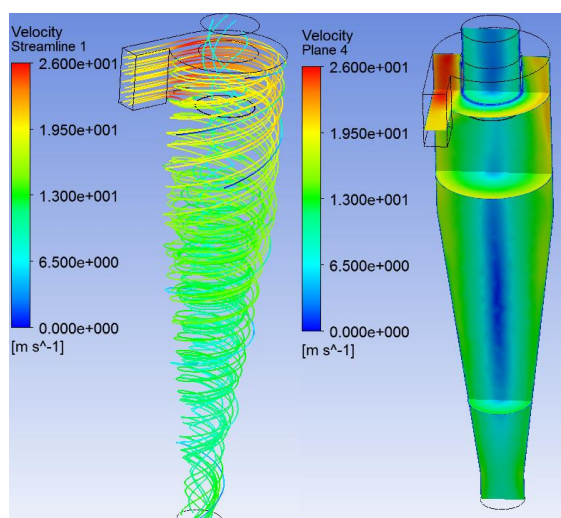


Figura 4: Perfil de escoamento Ciclone II

4.2 Perda de carga

No que diz respeito a pressão dentro do ciclone destaca-se a diminuição do seu valor da parede até ao centro. Os valores mais altos encontram-se na parte superior do ciclone na zona de entrada dos gases de escape e na fracção superior do cilindro. No centro sucede uma zona cilíndrica, do orifício inferior até ao superior, uniforme de pressão baixa. A figura 5 mostra a variação de pressões dos três ciclones com a mesma velocidade de entrada (15 m/s). Pode-se observar que a magnitude das pressões nos ciclones varia pouco.

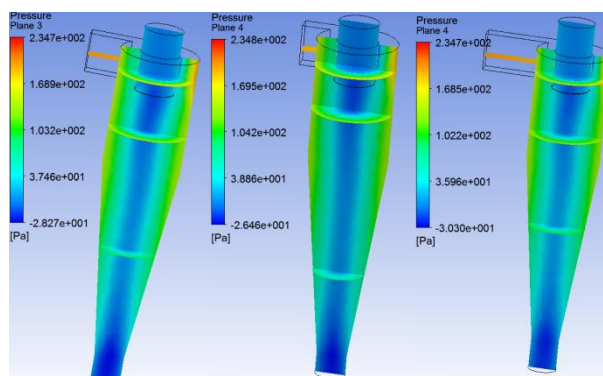


Figura 5: pressões nos Ciclones I, II e III à 15 m/s

A variação moderada de tamanho, entre os 3 ciclones, explicara este fenómeno.

Verifica-se ainda que a perda de carga diminui com a velocidade introduzida. Contudo pode-se dizer que de qualquer das formas a perda de carga em qualquer uma dos estudos é pequena.

4.3 Partículas

Em relação ao movimento de partículas e o seu comportamento no interior de cada um dos ciclones verifica-se uma divergência mínima. Em todos os estudos realizados, com os 3 ciclones e com as velocidades de entrada indicadas anteriormente, as partículas de um diâmetro maior de $1 \cdot 10^{-4} \text{m}$ saíram na secção inferior do ciclone, quer dizer, conseguiram ser capturadas e separados dos gases de escape. A única divergência encontrada foi no Ciclone I com uma velocidade de entrada de 20 m/s. Neste caso, só partículas de um diâmetro maior que $5 \cdot 10^{-4} \text{m}$ foram capturadas. Igualmente como na perda de carga pode-se explicar as semelhanças na diferença diminuta nos tamanhos dos três ciclones. Portanto podemos pronunciar que todas as partículas de tamanho referido vão ser filtrados dos gases de escape.

Em relação a partículas de tamanho menor, só um teste real poderá nos dar informações da quantidade de partículas que conseguem ser removidas. Muitos estudos, realizados por outros autores, referem, que só uma certa percentagem de partículas de um determinado tamanho são capturadas e que essa percentagem obviamente diminui conforme o tamanho da partícula diminui.

4.4 Conclusão

O objectivo deste estudo foi a escolha de um dos 3 ciclones apresentados para o fabrico e seguidamente para a realização de testes. O *Ansys FLUENT* é uma ferramenta da mecânica computacional muito poderosa, de uma complexidade grande que possibilita uma melhor compreensão das ocorrências no ciclone. A aplicação desejada, designadamente, o acoplamento de um ciclone a uma caldeira a pellets, traz certas limitações, particularmente no tamanho do equipamento a desenhar. É assim que se explica as variações diminutas dos resultados, tanto na variação de pressão como no movimento de partículas. Contudo é necessário examinar as diferenças para chegar a uma resolução.

No estudo revelou-se que o Cidone I será o pior em termos de filtração de partículas uma vez que a 20 m/s de velocidade de entrada o tamanho de partículas vai ser maior que nos outros dois casos. Segundo os dados recolhidos, os Cidones II e III na filtração de partículas têm o mesmo desempenho.

A perda de carga, como já referido anteriormente, é pouco diferente entre os três mas destaca-se que o Cidone III apresenta valores mais baixos.

Em estudos realizados demonstrou-se que a filtração de partículas de tamanho pequeno aumenta com a diminuição de tamanho do equipamento [1]. Como o objectivo é a remoção de um maior número possível de partículas foi escolhido o Cidone III para futuros estudos e testes em protótipo.

Referências

- [1] Mehdi Azadi, Mohsen Azadi, Ali Mohebbi, "A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters", Journal of Hazardous Materials, 2010
- [2] Jolius Gimbut, T.G. Chuah, A. Fakhru'l-Razi, Thomas S.Y. Choong, "The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study", Powder Technology, 1 Março 2006
- [3] Kung-Yu Kuo, Chuen-Jinn Tsai, "On the Theory of Particle Cutoff Diameter and Collection Efficiency of Cyclones", Aerosol and Air Quality Research, Vol 1, 2001

Apêndices

Apêndice A – SODECA Catalogo General



CA



Ventiladores centrífugos de alta presión

Características constructivas

- Carcasa reforzada en fundición de aluminio.
- Turbina en fundición de aluminio (alto rendimiento).
Temperatura máxima del aire a transportar: 120° C.
- Motores asíncronos, con rotor de jaula de ardilla.
En ejecución de serie se sirven con motor trifásico 230/400 V, 50 Hz hasta 5,5 CV y 400/690 V 50 Hz para potencias superiores; monofásico 230 V, 50 Hz. Aislamiento eléctrico clase F. Protección IP-55.
- Acabado anticorrosivo en resina de poliéster, polimerizada a 180°C., previo desengrase, fosfatación y pasivado.
- Bajo demanda:
 - Certificación ATEX, categoría 2, para atmósferas explosivas y marcado $\text{CE Ex II 2 G/D EEx e ó d}$.
 - Ventilador preparado para transportar aire hasta una temperatura máxima de 250°C.

Características técnicas

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible (A)			Potencia instalada (kW)	Caudal máximo (m ³ /h)	Nivel de presión sonora dB(A)	Peso Aprox. Kg.
		230V	400V	690V				
CA-234-2T	2870	1,73	1,00	-	0,37	280	72	10,2
CA-234-2M	2870	2,95	-	-	0,37	280	72	10,2
CA-142-2T-0,33	2735	1,39	0,80	-	0,25	460	73	22,5
CA-142-2T-0,50	2810	1,92	1,11	-	0,37	660	73	22,5
CA-148-2T-0,75	2830	2,42	1,40	-	0,55	420	74	28,0
CA-148-2T-1	2840	3,00	1,73	-	0,75	500	75	30,0
CA-148-2T-1,5	2850	4,16	2,40	-	1,10	990	76	32,0
CA-154-2T-1,5	2830	4,16	2,40	-	1,10	600	78	46,0
CA-154-2T-2	2860	5,63	3,25	-	1,50	800	79	48,5
CA-154-2T-3	2875	7,97	4,60	-	2,20	1280	80	50,5
CA-160-2T-2	2850	5,63	3,25	-	1,50	500	83	57,0
CA-160-2T-3	2860	7,97	4,60	-	2,20	900	84	58,0
CA-166-2T-3	2870	7,97	4,60	-	2,20	500	84	67,0
CA-166-2T-4	2870	10,57	6,10	-	3,00	950	85	73,0
CA-166-2T-5,5	2860	13,34	7,70	-	4,00	1600	86	76,0
CA-172-2T-5,5	2880	13,34	7,70	-	4,00	1100	87	90,0
CA-172-2T-7,5	2880	-	11,10	6,40	5,50	1710	88	112,0
CA-172-2T-10	2930	-	13,90	8,00	7,50	2300	89	124,0

Características acústicas

Los valores indicados, se determinan mediante medidas de nivel de presión y potencia sonora en dB(A) obtenidas en campo libre a una distancia equivalente a dos veces la envergadura del ventilador más el diámetro de la turbina, con un mínimo de 1,5 mts.

Espectro de potencia sonora Lw(A) en dB(A) por banda de frecuencia en Hz.

Modelo	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Modelo	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
234	38	51	65	72	80	79	73	64	160-2	54	67	81	88	96	97	88	80
142	39	52	66	73	81	80	74	65	160-3	55	68	82	99	97	95	89	81
148-0,75	43	56	70	77	85	83	77	69	166-3	55	68	82	99	97	95	89	81
148-1	44	57	71	78	86	84	78	70	166-4	56	69	83	90	98	96	90	82
148-1,5	45	58	72	79	87	85	79	71	166-5,5	57	70	84	91	99	97	91	83
154-1,5	47	60	74	81	89	87	81	73	172-5,5	59	72	86	93	101	100	94	85
154-2	48	61	75	82	90	88	82	74	172-7,5	60	73	87	94	102	101	95	86
154-3	49	62	76	83	91	89	83	75	172-10	61	74	88	95	103	102	96	87